

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**PAR  
FRANÇOIS BROUILLETTE**

**«VALORISATION DES BOUES DE DÉSENCRAGE  
PAR COMBUSTION»**

**AVRIL 1996**

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## **REMERCIEMENTS**

Je remercie très sincèrement mon directeur, le Dr Claude Daneault, ainsi que mon co-directeur M. Lorenzo Marchildon pour leur support et leur patience tout au long de la réalisation ce projet de recherche. J'ai également apprécié la grande collaboration du personnel et des autres étudiants du Centre de Recherche en Pâtes et Papiers qui étaient disponibles à chaque fois que celle-ci était requise.

Je voudrais souligner la collaboration et la disponibilité du personnel des trois usines qui m'ont accueilli à plusieurs reprises et m'ont permis de recueillir les échantillons nécessaires au projet.

Je voudrais également remercier M. Jean-Marc Brousseau de la compagnie Barr & Murphy (Canada) Ltée d'avoir rendue possible la réalisation de ce projet en prêtant une unité pilote de séchage des boues ainsi que M. Richard Kistner, aussi de Barr & Murphy, pour sa patience lors de l'installation pour le moins «ardue» de l'unité pilote au CRPP ainsi que pour m'avoir révélé les astuces de fonctionnement de l'appareil.

Je m'en voudrais de ne pas avoir une pensée pour les électriciens de l'Université qui ont mis à profit leurs connaissances à de nombreuses reprises sur l'unité pilote.

## RÉSUMÉ

La composition des boues de pâtes et papiers varie considérablement d'une usine à l'autre, ce qui reflète la grande variété de matière première et de procédés. Les boues primaires et de désencrage sont composées principalement d'un mélange de fibres fines, de charges minérales et de produits chimiques adsorbés. Les boues secondaires sont générées par l'utilisation des procédés biologiques et sont habituellement aqueuses.

Le choix d'une méthode de disposition des boues devrait être rentable tant au point de vue économique qu'environnemental. La production d'un matériel utile et la transformation des boues, que l'on considérait comme un déchet sans valeur, en énergie devraient constituer une priorité pour l'industrie des pâtes et papiers.

La production maximale d'énergie à partir des boues de pâtes et papiers est obtenue en diminuant leur contenu en eau. Cette diminution de contenu en eau nécessite un apport d'énergie mécanique ou thermique. Il importe donc de connaître le gain d'énergie apporté aux boues par leur séchage en comparaison avec l'énergie requise pour les séchées. L'étude du séchage des boues visait l'atteinte de cet objectif. Le système de séchoir rotatif retire de grandes quantités d'eau des boues et opère à des températures beaucoup plus basse que les incinérateurs. Le matériel est séché rapidement, sans que les boues «cuisent», ce qui permet d'éviter leur décomposition et l'émission de composés volatils.

Notre étude vise à estimer la valeur calorifique des boues primaires et de désencrage avant et après qu'elles aient été séchées dans le séchoir rotatif.

Les résultats indiquent que la réduction du contenu des boues en eau à l'aide du séchoir permet d'augmenter l'énergie disponible lors de la combustion. Le séchage de boues de désencrage de papier journal possédant un contenu en cendres d'environ 35 % (boues sèches) permet d'augmenter leur valeur calorifique de près de 40 %, ce qui représente 12 000 kJ/kg à 80 % de matières solides. À ce niveau, les boues sont suffisamment sèches pour entretenir elles-mêmes leur combustion.

Des échantillons de boues de papiers fins possédant un contenu en cendres de 55 % ont également été utilisés dans le séchoir. La valeur calorifique de ces boues est de 6 000 kJ/kg à un contenu en matières solides de 80 %, ce qui montre qu'une hausse de 20 % du contenu en cendres diminue la valeur calorifique des boues de 50 %.

L'efficacité du séchoir rotatif a été évaluée. Les résultats montrent que le séchage des boues avant leur combustion permet aux usines de pâtes et papiers de faire un meilleur usage de la ressource énergétique que constituent les boues de désencrage comparé à la technique conventionnelle de pressage et incinération.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>i</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>ii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS.....</b>	<b>viii</b>
 <b>CHAPITRE I - INTRODUCTION.....</b>	 <b>1</b>
 <b>CHAPITRE II - LES BOUES DE DÉSENCRAGE ET LEUR VALORISATION .....</b>	 <b>5</b>
2.1 Les boues de désencrage.....	5
2.1.1 Le procédé de désencrage.....	5
2.1.2 Toxicité des boues de désencrage.....	10
2.1.3 Composition des boues de désencrage .....	11
2.2 Les possibilités de valorisation des boues de désencrage.....	13
2.2.1 La situation actuelle .....	13
2.2.2 Méthodes de valorisation des boues .....	14
2.2.3 L'opinion publique .....	20
 <b>CHAPITRE III- LA COMBUSTION DES BOUES DE DÉSENCRAGE.....</b>	 <b>22</b>
3.1 La solution : le séchage et la combustion des boues.....	22
3.2 Le conditionnement des boues .....	24
3.2.1 Le pressage des boues.....	24
3.2.2 Le séchage des boues.....	25
3.2.3 L'unité pilote de séchage des boues .....	25
3.3 La combustion des boues .....	26
3.3.1 Treillis mobiles (Travelling grate).....	30
3.3.2 Lits fluidisés .....	30
3.3.3 Oxydation humide .....	31

3.4	Objectifs poursuivis.....	32
<b>CHAPITRE IV - MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE .....</b>		<b>33</b>
4.1	Échantillonnage .....	33
4.2	Caractérisation des boues.....	33
4.2.1	Analyse préliminaire .....	34
4.2.2	Éléments minéraux et métaux lourds .....	35
4.2.3	Acides gras et résiniques.....	35
4.2.4	Paramètres physico-chimiques .....	36
4.3	Chaleur de combustion des boues.....	37
4.4	Séchage des boues sur unité pilote .....	38
4.4.1	Détermination des conditions d'opération sur l'unité pilote .....	38
4.4.2	Essais de séchage des boues.....	38
<b>CHAPITRE V - RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>		<b>40</b>
5.1	Caractérisation des boues de désencrage.....	40
5.2	Chaleur de combustion des boues.....	45
<b>CHAPITRE VI - CONCLUSION .....</b>		<b>52</b>
<b>CHAPITRE VII - BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>54</b>
<b>ANNEXES</b>		
I-	Analyse thermogravimétrique des boues de désencrage.	
II-	Détermination des métaux par spectroscopie d'absorption atomique.	
III-	Détermination des acides gras et résiniques dans les boues de désencrage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse après dérivation avec BSTFA ou BF <sub>3</sub> -méthanol.	
IV-	Détermination de la chaleur de combustion des boues par calorimétrie différentielle.	

## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Contenu en fibres recyclées exigé dans le papier journal pour quelques états américains.....	1
1.2	Usines de désencrage au Québec .....	2
1.3	Composition des rejets des usines de pâtes et papiers au Québec en 1990 .....	3
1.4	Méthodes de disposition des boues primaires au Québec en 1990.....	4
2.1	Rejets à chaque étape du système de désencrage .....	7
2.2	Exemples d'agents collecteurs (flottation) de dispersants (lavage) et de disperseurs («flottation et lavage»).....	9
2.3	Méthodes de valorisation des boues de désencrage .....	14
3.1	Nombre de compagnies utilisant ou intéressées à utiliser les nouvelles technologies dans le domaine des pâtes et papiers .....	23
4.1	Plan d'échantillonnage .....	34
4.2	Les charges minérales dans le papier.....	35
4.3	Métaux dosés dans les boues de désencrage et types de flammes utilisés .....	36
4.4	Acides gras et résiniques dosés dans les boues de désencrage .....	37
4.5	Siccités utilisées pour les mesures de chaleur de combustion .....	38
4.6	Détermination des conditions d'opération sur l'unité pilote .....	38
4.7	Séchage des boues et des mélanges de boues sur l'unité pilote .....	39
5.1	Caractérisation des boues de désencrage.....	40
5.2	Composition moyenne des boues de désencrage .....	41
5.3	Concentration moyenne de certains métaux dans les boues de désencrage .....	46
5.4	Séchage des boues.....	51



## LISTE DES FIGURES

2.1	Système de désencrage flottation-lavage .....	7
2.2	Schéma des étapes de trituration et flottation.....	10
2.3	Composition des boues de désencrage.....	12
2.4	Diagramme d'écoulement du compostage des boues de pâtes et papiers par pile statique .....	18
2.5	Importance accordé par le public à chaque aspect des méthodes de gestion des boues.....	21
2.6	Préférence du public pour chaque alternative de gestion des boues .....	21
3.1	Schéma de l'unité pilote de séchage des boues .....	27
3.2	Processus de combustion simplifié .....	28
3.3	Effet de l'humidité sur la température de la zone de combustion .....	29
3.4	Schéma d'un système de combustion des boues par lits fluidisés.....	31
5.1	Contenu des boues des usines A et B en acides gras.....	42
5.2	Contenu des boues des usines A et B en acides résiniques.....	43
5.3	Charges minérales dans les boues des usines A et C .....	44
5.4	Chaleur de combustion des boues en fonction de la siccité.....	46
5.5	Chaleur de combustion des boues en fonction du contenu en cendres..	47
5.6	Détermination des conditions de séchage sur l'unité pilote.....	48
5.7	Gain d'énergie en fonction de la capacité thermique.....	49

## LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

BSTFA	bis-Triméthylsilyltrifluoroacétamide
AGR	Acides gras et résiniques
b.s.	Boues sèches
b.h.	Boues humides
t.s.	Tonnes sèches

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

Un des buts du recyclage est de diminuer la quantité de déchets que l'on envoie au dépotoir. Il est donc tout à fait normal que les produits du papier, qui représentent 40 à 45% des déchets domestiques (1), fassent l'objet d'un recyclage intensif. Ce recyclage est appuyé par des lois, principalement aux États-Unis, qui fixent la proportion de fibres recyclées que doivent contenir certains types de papier (Tableau 1.1). Certains états vont encore plus loin : par exemple, la Floride impose aux éditeurs depuis octobre 1992 une taxe de 50¢/tonne sur le papier journal (2). La taxe est remboursée si le contenu du papier en fibres recyclées atteint 50%.

**Tableau 1.1 Contenu en fibres recyclées exigé dans le papier journal pour quelques états américains (1)**

État	Contenu moyen en matières recyclées (%)	
	1992-1993	1995-1996
Caroline du Nord	15	30
Connecticut	16	31
Illinois	28	-
Maryland	15	30
Missouri	10	40
Orégon	-	25
Rhode Island	11	22
Texas	10	10
Wisconsin	10	30

Cette réglementation a favorisé l'émergence de toute une industrie du désencrage pour répondre à la demande en fibres recyclées. Par exemple, jusqu'en 1985 le Québec ne comptait que deux usines de désencrage des vieux papiers. Cependant, depuis cette date, neuf autres usines se sont lancées dans le désencrage, ce qui a eu pour effet de faire monter en flèche la demande en vieux papiers (Tableau 1.2). Celle-ci est passée de moins de 200 000 tonnes à plus de

1 000 000 de tonnes par année en moins de 10 ans au Québec (3). En 1992, il y a même eu pénurie de vieux papiers et les producteurs canadiens de papier journal ont dû en importer près de 700 000 tonnes (4).

**Tableau 1.2 Usines de désencrage au Québec (2)**

<b>Société</b>	<b>Localisation</b>	<b>Début de production</b>	<b>Demande en vieux papiers (tonnes/année)</b>	<b>Principale utilisation de la pâte désencrée</b>
PFCP	Gatineau	1992	210 000	Papier journal
CMD	Cap-de-la-Madeleine	1992	95 000	Papier journal
Daishowa	Québec	1992	160 000	Papier journal
Kruger (phase 1)	Bromptonville	1992	60 000	Papier journal
Kruger (phase 2)	Bromptonville	n.d.	120 000	Papier journal
Stone-Consolidated	Shawinigan	1993	90 000	Papier journal
Cascades	Breakeyville	1985	36 000	Papiers tissus + papiers fins
	Kingsey Falls	1990	44 000	Papiers tissus
	East Angus	1990	25 000	Cartons couchés
Papiers Scott	Crabtree	1976	80 000	Papiers tissus
		1992	40 000	Papiers tissus
Papiers Perkins	Candiac	1973	80 000	Papiers tissus

Cependant, la technologie utilisée actuellement pour effectuer le désencrage du papier n'est pas sans causer de problèmes. Les usines de désencrage, tout comme les usines de pâtes et papiers traditionnelles, génèrent d'importantes quantités de rejets solides que l'on doit éliminer de la façon la plus acceptable possible tant au point de vue économique qu'environnemental. En effet, durant l'année 1990, les usines de pâtes et papiers du Québec ont produit près de 2 700 tonnes sèches (t.s.) de rejets qui consistaient principalement dans des boues primaires et des écorces (5). Les cendres, les boues de désencrage et secondaires ne représentaient que moins de 10 % de ceux-ci (Tableau 1.3).

**Tableau 1.3 Composition des rejets des usines de pâtes et papiers au Québec en 1990 (4)**

Rejet	Quantité (%)
Boues primaires	46,2
Écorces	45,4
Cendres	4,7
Boues de désencrage	3,5
Boues secondaires	0,2

Depuis quelques années, la proportion des boues de désencrage et secondaires est à la hausse et on prévoit que celle-ci se poursuivra avec le resserrement des normes fixant le contenu en fibres recyclés dans le papier et l'obligation pour la plupart des usines de pâtes et papiers du Québec d'effectuer un traitement secondaire de leurs effluents dès l'automne 1995 afin de rencontrer les nouvelles normes gouvernementales en cette matière. Pour supporter cette affirmation, il suffit de constater qu'en 1990, les activités de désencrage et de traitements secondaires produisaient 99 t.s. de boues par jour. Cette année, on prévoit que cette production atteindra 682 t.s. par jours (4). De plus, parmi tous les procédés générateurs de rejets que l'on vient d'énumérer, le désencrage est sans doute le plus grand producteur de boues. En effet, une usine typique de pâte kraft blanchie produit environ 191 kg de boues par tonne de produit alors que le désencrage peut produire 441 kg de boues par tonne de produit soit 2,3 fois plus (4). Étant donné que le désencrage prend une place de plus en plus importante dans le domaine des pâtes et papiers, c'est donc principalement sur les possibilités de valorisation des boues de désencrage que nous allons porter notre attention.

À l'origine, comme le montre le Tableau 1.4, l'industrie des pâtes et papiers disposait principalement de ses boues dans des sites d'enfouissement. Une certaine partie était également brûlée, la plupart du temps sans être séchée, ce qui nécessitait un combustible d'appoint. Cependant, ces pratiques ne pourront pas se perpétuer et des alternatives devront être développées rapidement. En effet, il est prévu que la majorité des sites d'enfouissement américains seront pleins dès 1998 et que l'obtention de nouveaux permis d'exploitation sera de plus en plus

difficile (1). Les coûts d'opération seront également à la hausse et de nouvelles lois visant à protéger l'environnement mettront l'accent sur la minimisation des rejets (6).

**Tableau 1.4 Méthodes de disposition des boues primaires au Québec en 1990 (4)**

Méthode	Utilisation (%)
Enfouissement	81
Combustion	14
Compostage	4
Recyclage	1

De nouvelles méthodes de valorisation des boues de pâtes et papiers sont donc explorées dans le but de rencontrer ces nouvelles réalités. On peut les diviser en trois groupes:

- a) Premièrement, les méthodes orientées vers une utilisation directe des boues à des fins de fertilisation ou d'amendement pour les sols: épandage agricole, épandage sylvicole et compostage.
- b) Deuxièmement, les méthodes de combustion des boues qui permettent de récupérer l'énergie contenue dans les boues sous forme de chaleur et de diminuer leur volume: incinération, lits fluidisés et oxydation par voie humide.
- c) Finalement, les autres méthodes qui utilisent les boues comme matériel de base pour fabriquer d'autres produits: fabrication de briques, de panneaux de particules, d'éthanol etc.

Il convient donc d'examiner de plus près chacune de ces méthodes afin de déterminer les avantages et les inconvénients qu'elles peuvent représenter dans le contexte canadien. Par exemple, une usine qui choisit de procéder à l'épandage agricole de ses boues doit s'assurer de pouvoir disposer de surfaces d'épandage suffisantes et trouver un moyen d'entreposer ses boues durant l'hiver, alors que l'épandage est impossible.

## **CHAPITRE II**

### **LES BOUES DE DÉSENCRAGE ET LEUR VALORISATION**

Afin de bien identifier les possibilités de valorisation des boues de désencrage, il est essentiel de connaître leur composition. Celle-ci est influencée par de nombreux facteurs, tous contrôlés à l'intérieur du procédé de désencrage, comme le type de vieux papiers recyclé, le système de désencrage utilisé et le traitement des effluents. La composition des boues de désencrage diffère des autres types de boues générées par les usines de pâtes et papiers, les boues primaires et secondaires.

Les boues primaires proviennent de l'enlèvement des matières en suspension présentes dans les eaux usées. Ces matières sont habituellement retirées à l'aide d'un traitement de floculation suivi d'une décantation dans un clarificateur ou d'une flottation.

Les boues secondaires, quant à elles, sont composées de la biomasse produite par le procédé de traitement biologique (aérobie ou anaérobie) des eaux usées. La composition des boues de désencrage se rapproche plus de celle des boues primaires que de celle des boues secondaires.

#### **2.1 Les boues de désencrage**

##### **2.1.1 Le procédé de désencrage**

Le procédé de désencrage se fait en quatre étapes: mise en suspension des vieux papiers ou trituration, décrochage de l'encre, dispersion et élimination des particules d'encre. La Figure 2.1 montre le schéma d'un système de désencrage combiné flottation-lavage traditionnel. Certaines modifications peuvent être apportées au système selon le type de vieux papiers que l'on veut désencrer et l'utilisation qui sera faite de la pâte désencrée mais aucune de ces quatre étapes ne peut être éliminée. Par exemple, une usine produisant des papiers tissus éliminerait presque totalement les additifs minéraux présents dans les vieux papiers qu'elle recycle afin de ne pas nuire à la résistance du produit fini. Par contre,

une usine qui recycle les vieux papiers pour la production de pâte à papier journal préférerait conserver une certaine partie de ces additifs afin d'augmenter le rendement du procédé sans trop affecter les propriétés de la pâte produite. Ces deux usines doivent donc adapter leur système afin de pouvoir conserver ou non les additifs minéraux.

Chacune des étapes du désencrage produit des rejets. Les boues représentent environ 95% du volume des rejets et proviennent principalement des étapes de flottation, de lavage-épaississage et de clarification. Parmi les autres rejets, on trouve les contaminants étrangers aux vieux papiers comme les emballages de plastique, les pièces de métal, les attaches et les élastiques. Le Tableau 2.1 dresse une liste des contaminants retirés du système à chaque étape du procédé de désencrage. Voyons maintenant plus en détails les différentes étapes du désencrage :

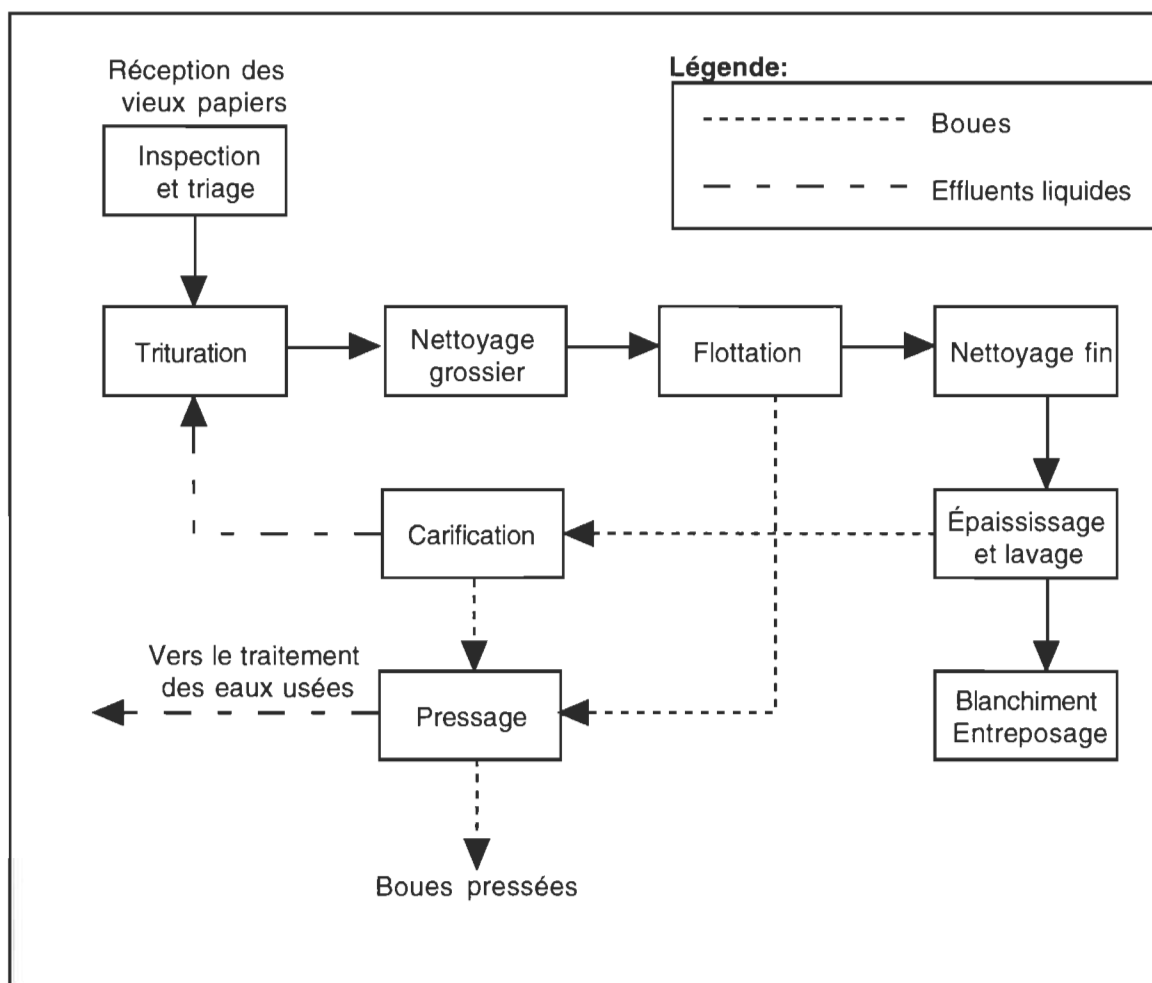
**1) Trituration** : la mise en suspension et le décrochage des particules d'encre des fibres s'effectue à cette étape. L'agitation de la suspension cause un frottement entre les fibres qui aide à détacher les particules d'encre. C'est également à ce moment que l'on ajoute certains produits chimiques afin de diminuer la quantité d'énergie mécanique requise :

**2) Hydroxyde de sodium (NaOH)** : maintient le pH alcalin, ce qui augmente l'efficacité de blanchiment du peroxyde d'hydrogène, augmente la flexibilité des fibres améliorant l'action des agents de désencrage, brise le liant des encres conventionnelles à base d'huile.

**3) Tensioactif** : favorise le mouillage du papier en abaissant la tension superficielle de l'eau, provoque la micellisation des particules d'encre dans la phase aqueuse et réduit leur redéposition.

**4) Silicate de sodium** : agit comme agent séquestrant du calcium et du magnésium, agent alcalin, tampon et agent mouillant. Il agit également comme dispersant, ce qui peut causer des problèmes au niveau de la flottation s'il est utilisé en trop grande quantité.





**Figure 2.1 Système de désencrage flottation-lavage (7)**

**Tableau 2.1 Rejets à chaque étape du système de désencrage (8)**

Étape	Rejets
Inspection et triage	Attaches et lots contaminés
Trituration	Fil, plastique, bois, papier résistant à l'eau, métal et tissus
Nettoyage grossier	Plastique, trombone, élastiques, agrafes, colle, poussière et latex
Flottation	Fibres, encres et charges
Nettoyage fin	Particules de colle, plastiques légers, sable, vernis et encres UV
Épaississage et lavage	Fibres fines, charges, encre, latex

**5) Peroxyde d'hydrogène** : agit comme agent de blanchiment pour contrer l'effet de jaunissement des fibres dû à l'utilisation de NaOH.

**6) Agent chélatant** : forme des complexes avec les ions métalliques qui pourraient détruire le peroxyde d'hydrogène. (Par exemple : DTPA, EDTA).

Une fois la trituration terminée, on obtient un mélange dont on doit séparer les divers constituants pour récupérer les fibres. Cette opération s'effectue soit par flottation, par lavage ou par une combinaison des deux procédés.

**A) Flottation** : Dans la cellule de flottation, on injecte des bulles d'air qui sont dispersées dans la suspension de fibres et d'encre résultant de la trituration. La consistance est habituellement diminuée entre 0,8 et 1,2%. Les particules d'encres en suspension sont généralement trop petites pour pouvoir adhérer aux bulles d'air et être entraînées vers la surface de la cellule. Elles «rebondissent» sur les bulles d'air. Il est donc nécessaire de former des agrégats de particules qui pourront être retirés du système plus facilement. Cette opération s'effectue à l'aide d'un «collecteur», un agent tensioactif qui agit en rassemblant les particules d'encre en agrégats hydrophobes. Pour ce faire, on utilise le plus souvent des savons d'acides gras qui sont ajoutés sous forme acide, donc soluble, lors de la trituration ou à l'alimentation de la cellule de flottation ceux-ci sont rendus insolubles avant la flottation par l'ajout de chlorure de calcium. Habituellement, on utilise une proportion de 0,7 à 1,0% du poids de pâte au triturateur (7). Le Tableau 2.2 montre la structure de ces savons. Les agrégats de collecteur et de particules d'encres peuvent alors être entraînés vers la surface par les bulles d'air où ils forment une mousse qui est enlevée mécaniquement.

La taille optimale des particules pour effectuer la flottation se situe entre 20 et 60  $\mu\text{m}$ . Ces particules sont visibles à l'œil nu : elles nous apparaissent comme des taches sur le papier. Les plus grosses particules peuvent être enlevées à l'aide de tamis et d'épurateurs alors que celles qui se situent sous les 30  $\mu\text{m}$  doivent être enlevées par lavage. La Figure 2.2 montre les étapes du procédé de trituration et de flottation.

**B) Lavage** : Cette étape consiste à disperser les particules afin qu'elles atteignent une taille suffisamment petite pour être enlevées par rinçage à travers le matelas

fibreux. C'est également à cette étape que l'on retire les additifs minéraux du papier, si nécessaire. Le lavage diffère de l'épaississage par le fait que dans ce dernier, aucun élément n'est enlevé du système. Par la suite, les particules entraînées dans l'effluent du lavage doivent être retirées. Comme il a déjà été mentionné, le lavage est efficace pour des particules de taille inférieure à environ 20  $\mu\text{m}$ . Ces particules influencent la blancheur du papier, même si elle ne sont pas visibles à l'oeil nu.

**Tableau 2.2 Exemples d'agents collecteurs (flottation) de dispersants (lavage) et de dispsecteurs («combinaison des deux surfactants») (7)**

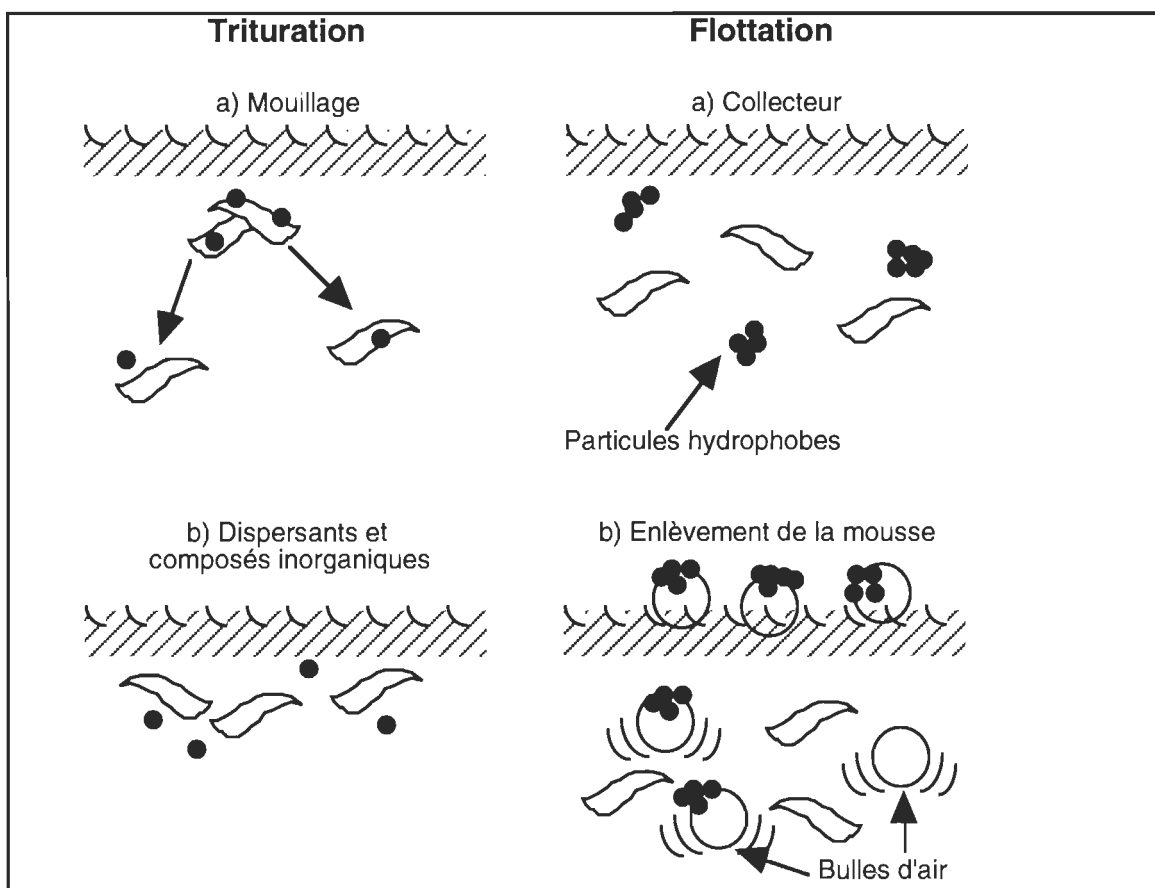
Classe de molécule	Type de surfactant	Structure
Éthoxylate d'alkylphénol	Dispersant	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n(\text{C}_6\text{H}_4)(\text{OCH}_2\text{CH}_2)_m\text{-OH}$
Éthoxylate d'alcool linéaire	Dispersant	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{-(OCH}_2\text{CH}_2)_m\text{-OH}$
Savon d'acide gras	Collecteur	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{C(O)O}^-/\text{Na}^+$
Éthoxylate d'acide gras	Displecteur	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{C(O) -(OCH}_2\text{CH}_2)_m\text{-OH}$

Le lavage utilise des surfactants non ioniques produisant peu de mousse. Ceux-ci rendent les particules d'encre hydrophiles et les stabilisent dans la solution. Les types de surfactants utilisés dans le lavage sont des éthoxylates d'alkylphénol ainsi que des éthoxylates d'alcools linéaires (Tableau 2.2). Ils sont utilisés seuls ou en mélange et sont ajoutés au tritrateur dans une proportion de 0,5 à 0,75% du poids de vieux papiers (7).

**C) Clarification :** Dans le clarificateur, les particules d'encre finement dispersées lors de l'étape du lavage doivent être agglomérées à l'aide d'un polymère de floculation. Le floc résultant peut être enlevé soit par sédimentation ou par flottation à l'aide d'oxygène dissout.

Il est important de contrôler la quantité d'effluent que l'on retire du lavage afin de minimiser les coûts de clarification. En effet, l'effluent du lavage qui parvient au clarificateur contient également des fibres qui, éventuellement, se retrouveront dans les boues et seront perdues. Donc, plus on retire de particules d'encre au lavage, plus on retire de fibres du procédé.

**D) Pressage :** Les résidus solides provenant de la clarification et de la flottation sont ensuite pressés pour en faciliter la manipulation. Divers types de presses peuvent être utilisés. Les principaux sont les presses à vis et les presses à bandes à basse vitesse. Le pressage des boues sera examiné plus en détails à la section 3.2.1.



**Figure 2.2 Schéma des étapes de trituration et de flottation (9)**

### 2.1.2 Toxicité des boues de désencrage

La grande majorité des paramètres environnementaux (anions, cations, composés organiques volatils etc.) testés sur les boues, les eaux de surface et les lixiviats des sites d'enfouissement de boues de pâtes et papiers montrent des résultats sous les limites de détection des méthodes utilisées, les autres étant à l'intérieur des limites permises (10). L'idée répandue voulant que les boues de désencrage contiennent d'importantes quantités de métaux lourds provenant des encres est loin de la réalité. En effet, l'industrie des encres d'impression a pratiquement éliminé l'utilisation des métaux lourds comme pigments dans les

encres (10). Cependant, il se peut que certains vieux papiers datant de plusieurs années contiennent toujours des encres à base de métaux lourds et des BPC. Ces derniers étaient utilisés dans les papiers à copie sans carbone au début des années 1970 (11).

### **2.1.3 Composition des boues de désencrage**

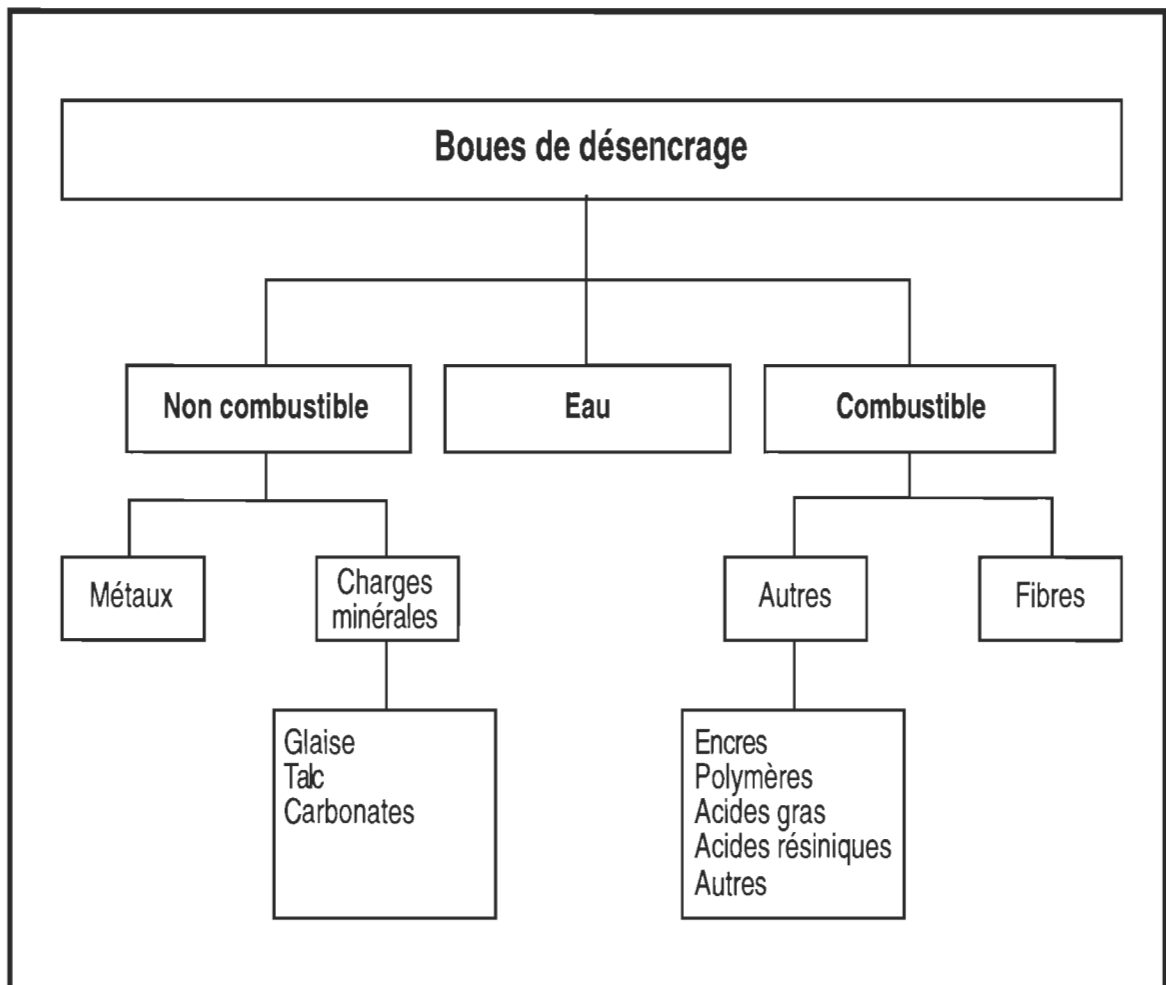
Le survol du procédé de désencrage nous a permis de déterminer la provenance des boues de désencrage ainsi que d'identifier les rejets qui en font partie. Une fois les boues générées, il faut trouver des méthodes pour «s'en débarrasser» ou pour les valoriser, selon la vision que l'on a de l'environnement.

Dans le but de bien identifier les possibilités de valorisation, il est utile de schématiser le contenu des boues et de déterminer les proportions de chacun des constituants majeurs. On peut représenter de plusieurs façons la composition des boues, mais celle, qui est présentée à la Figure 2.3, sera utilisée dans les sections subséquentes.

Les boues se divisent d'abord en trois grandes parties : matière combustible, matière non combustible et eau. L'eau peut être associée à la partie non combustible, mais, contrairement à cette dernière, l'eau s'évapore lorsque l'on effectue la combustion des boues et ne se retrouve pas dans les cendres. Dans la partie non combustible, on trouve les additifs minéraux (charges) et d'autres métaux.

Les charges contiennent surtout du kaolin (glaise), du talc et des carbonates. Ces produits sont ajoutés au papier afin d'en modifier les propriétés physiques et optiques. Parmi les autres métaux que l'on retrouve dans les boues, on remarque le fer, le cuivre et le manganèse.

Dans la partie combustible, on trouve les fibres courtes, celles qui ne peuvent être réutilisées dans la fabrication du papier, et d'autres composants comme les encres, principalement du noir de carbone (le pigment d'encre noire), les polymères de floculation utilisés dans le clarificateur, les acides gras utilisés lors de la flottation, certains acides résiniques provenant du bois et d'autres composés présents en très faible quantité.



**Figure 2.3 Composition des boues de désencrage**

## **2.2 Les possibilités de valorisation des boues de désencrage**

### **2.2.1 La situation actuelle**

Comme il a été mentionné plus haut, 81% des boues primaires qui représentent la majeure partie des boues générées à l'heure actuelle, est enfoui, 14% est brûlé, 4% est composté et 1% est recyclé.

Cependant, cette situation ne pourra se perpétuer principalement à cause des deux facteurs suivants :

#### ***A) Hausse des coûts d'enfouissement***

Jusqu'à maintenant, l'enfouissement était grandement favorisé à cause de préoccupations économiques. Cependant, les coûts d'enfouissement aux États-Unis pour une usine de papier journal effectuant du désencrage se situent maintenant entre 2 et 15 \$ par tonne de pâte produite mais ceux-ci peuvent doubler selon la localisation, le caractère privé ou public et l'âge du site (11).

De plus, à mesure que les sites d'enfouissement actuels cesseront d'opérer et que les nouveaux sites se feront de plus en plus rares, les coûts d'enfouissement seront encore à la hausse. C'est déjà le cas en Europe. Par exemple, en Allemagne on doit payer jusqu'à 175\$ la tonne pour le transport et l'enfouissement des boues (5). De plus, la mauvaise perception de l'enfouissement au niveau environnemental a amené le resserrement des normes de contrôle des sites d'enfouissement.

#### ***B) Possibilités de transformer un «déchet» en ressource***

Cet aspect de la gestion des boues s'inscrit dans la nouvelle philosophie de gestion des sous-produits de fabrication qui sont maintenant considérés comme des ressources dont on peut tirer profit plutôt qu'en tant que rejets dont la disposition entraîne des coûts supplémentaires.

Toutes ces considérations nous poussent à trouver des alternatives à l'enfouissement qui ne constitue plus une méthode de disposition rentable aussi bien aux points de vue économique qu'environnemental.

## 2.2.2 Méthodes de valorisation des boues

On peut diviser les méthodes de valorisation en deux grandes catégories : celles qui nécessitent le transport des boues et celles qui peuvent s'appliquer directement sur le site de production des boues. Le Tableau 2.3 dresse une liste des diverses méthodes de valorisation des boues de désencrage qui ont été envisagées ou qui sont déjà en application dans diverses usines à travers le monde.

**Tableau 2.3 Méthodes de valorisation des boues de désencrage**

Méthodes nécessitant le transport des boues	Méthodes applicables sur le site de l'usine
Épandage agricole Épandage sylvicole Compostage* Incorporation dans la fabrication de matériaux de construction	Combustion, incinération Fabrication d'éthanol Recyclage pour la fabrication de papiers de grades inférieurs Pyrolyse sous vide

\* Le compostage peut se faire sur le site de l'usine à condition de disposer de l'espace requis.

Voyons maintenant plus en détails chacune des méthodes de valorisation applicables aux boues de désencrage.

### **A) Épandage agricole**

Cette méthode consiste à répandre les boues sur le sol dans le but d'aider la croissance des cultures agricoles. Cependant, l'épandage ne s'effectue pas simplement dans le but de se débarrasser des boues; on doit montrer clairement que leur application sur les sols possède un effet favorable sur les cultures afin de convaincre les utilisateurs potentiels de les accepter.

L'intérêt pour l'épandage des boues de pâtes et papiers à des fins agricoles n'est pas nouveau. En effet, il existe de nombreux cas d'étude de l'utilisation de ces boues sur les terres agricoles et de leur effet sur le rendement de diverses cultures (12, 13, 14, 15), certaines datant d'aussi loin que 1973 (16).

L'épandage des boues peut s'effectuer de plusieurs façons : elles peuvent être déposées directement sur le sol, injectées dans le sol ou vaporisées (17). La



matière organique (carbone et azote provenant des fibres de papier) et certains minéraux comme le potassium et le phosphore contenus dans les boues favorisent la croissance des plantes (18). L'épandage s'effectue en-dehors des périodes de culture, c'est-à-dire au printemps et à l'automne et un délai d'un an est généralement nécessaire afin de rendre la matière organique biodisponible.

Parmi les avantages de l'épandage, on peut citer les faibles concentrations en métaux lourds par rapport aux boues municipales, la diminution des quantités de fertilisants utilisée sur les cultures et la facilité d'utilisation du procédé qui ne requiert aucun traitement sur les boues, sinon un pressage à la consistance désirée.

Un des principaux inconvénients de l'épandage consiste dans la nécessité de disposer de grandes surfaces. Par exemple, une usine produisant 90 t.s. de boues à 26% de consistance par jour en génère assez pour couvrir un terrain de 80 acres sur une profondeur de 2,5 mètres en approximativement 10 ans. Il n'est donc pas surprenant de constater que l'épandage agricole soit plus populaire dans les régions comme le centre et l'ouest des États-Unis, où les terres agricoles sont nombreuses.

Parmi les autres inconvénients, on note l'accumulation possible de BPC et de métaux lourds sur une longue période de temps (8,11) et la présence de charges et de glaises dans les boues qui diminuent le drainage du sol. Un autre point à noter, on doit prévoir un espace d'entreposage des boues pendant l'hiver, alors que l'épandage est impossible. Les boues peuvent être entreposées sur le terrain de l'usine ou sur le site récepteur. Plus l'hiver est long, plus la période d'épandage est courte, ce qui oblige à trouver des surfaces d'épandage encore plus grandes, chaque site ne pouvant accepter qu'une quantité limitée de boues. Un maximum de 25 tonnes/acre est conseillé pour les boues primaires, comparables aux boues de désencrage, étant donné leur rapport C:N élevé (45:1 à 60:1) (14). Ce rapport est beaucoup plus élevé que le rapport de 25:1 à 30:1 auquel l'azote commence à être immobilisé par les micro-organismes dégradant le carbone organique (19).

Également, avant de procéder à l'épandage, on doit procéder à une étude des sites potentiels: genres de sol, pentes et topographie, proximité de puits,

drainage, et ensuite obtenir tous les permis nécessaires (20). Le Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec a d'ailleurs publié en 1987 un «Guide des bonnes pratiques» au sujet de la valorisation agricole des boues de stations d'épuration des eaux municipales définissant tous les paramètres permettant de réaliser l'épandage des boues en milieu agricole (21).

### ***B) Épandage sylvicole***

L'épandage sylvicole des boues de pâtes et papiers vise le même objectif que l'épandage agricole soit favoriser la croissance des végétaux tout en permettant de valoriser les rejets du traitement des eaux usées des usines. Bien qu'il n'ait pas reçu le même intérêt que l'épandage agricole, l'épandage sylvicole présente plusieurs avantages qui lui sont propres comme (22):

- i) Les cultures forestières ne sont généralement pas comestibles pour les humains, ce qui réduit le risque de l'accumulation de substances dangereuses dans la chaîne alimentaire;
- ii) Même s'ils sont adaptés à un faible niveau de nutriments dans les sols, les espèces forestières réagissent à l'apport supplémentaire de nutriments provenant de l'application des boues en augmentant leur biomasse. Les récoltes peuvent donc être plus fréquentes;
- iii) Les sols forestiers sont généralement poreux (ce qui réduit les pertes en surface) et pauvres en nutriments (ce qui permet d'augmenter grandement leur contenu en matière organique par l'application des boues);
- iv) Les sites forestiers sont habituellement isolés, ce qui permet de réduire les risques de contacts des humains avec les boues récemment appliquées.

Aucune publication d'essais d'utilisation sylvicole des boues de désencrage n'a été identifiée dans les références consultées, mais des tentatives ont été effectuées avec des boues de stations d'épuration municipales (23) et des boues primaires de pâtes et papiers (22). Celles-ci ont donné des résultats différents selon les essences de bois étudiées. Dans chacun des cas, il a fallu déterminer le taux d'application à ne pas dépasser pour permettre d'obtenir un apport de

nutriment favorisant la croissance des espèces, ce qui représente un travail long et fastidieux réparti sur plusieurs années. Le Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec a également publié en 1991 un «Guide des bonnes pratiques» au sujet de la valorisation sylvicole des boues de stations d'épuration des eaux municipales définissant tous les paramètres permettant de réaliser l'épandage des boues en forêt (24).

### **C) Compostage**

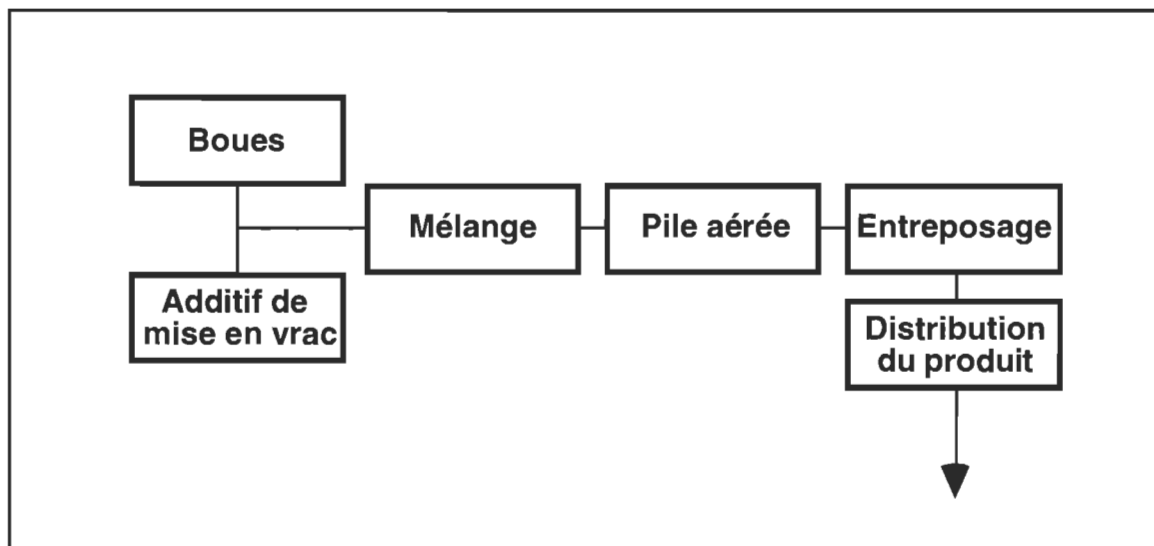
Le compostage consiste dans la décomposition biochimique de la matière organique en humus sans danger pour l'environnement. Il s'effectue généralement en utilisant un mélange de boues et d'additif de mise en vrac comme des écorces ou des copeaux pour assurer une aération uniforme (25,26,27). Les boues peuvent être compostées selon plusieurs méthodes. Les trois le plus fréquemment rencontrées sont :

- i) Tas en fermentation (Figure 2.4) : les boues sont empilées sur une base munie d'un dispositif d'aération permettant d'introduire de l'air à l'intérieur de la pile. Après un délai d'environ trois semaines, les boues sont dirigées vers un site de maturation où elles séjournent pendant au moins un mois.
- ii) Compostage en tas : cette méthode diffère du tas en fermentation par le fait que les boues sont aérées en les retournant périodiquement à l'aide d'une pelle mécanique.
- iii) Bio-réacteur : cette méthode consiste à fournir les conditions optimales à l'accélération du compostage. La circulation d'air, la température et l'humidité sont contrôlées.

Certaines études ont même été réalisées dans le but d'incorporer le compostage à la ligne de désencrage plutôt que de générer les boues d'abord pour ensuite les traiter (28).

Le compostage permet d'obtenir une réduction du poids, du volume et du pourcentage de cellulose dans les boues, donc une baisse du rapport C:N. Il permet même de détruire certains produits organochlorés produits lors du

blanchiment de la pâte (29,30). Cela facilite le transport et la manutention et permet même de générer des profits en vendant le produit composté comme fertilisant.



**Figure 2.4 Diagramme d'écoulement du compostage des boues de pâtes et papiers par tas en fermentation (25)**

Entre autres avantages mentionnons que les investissements requis pour procéder au compostage ne sont pas élevés, que la mise en service des installations s'effectue rapidement et que le procédé utilise peu d'énergie (25). Par contre, le séchage préalable des boues et le temps de compostage constituent des problèmes importants. En effet, les boues trop humides ne peuvent être compostées étant donné que l'air ne peut y circuler. De plus, les boues peuvent s'accumuler assez rapidement selon la production de l'usine et l'espace requis pour procéder au compostage peut devenir très important. Une méthode de disposition d'appoint peut s'avérer nécessaire.

#### **D) Combustion**

Selon une étude de la Direction de la technologie de l'efficacité énergétique et des énergies de remplacement du Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET), le désencrage du papier journal et la combustion des boues de désencrage viennent respectivement au premier et quatrième rang des technologies à développer pour le futur de l'industrie des pâtes et papiers au Canada (31). De plus, la méthode la plus utilisée pour la disposition des boues de désencrage sera le pressage suivi d'une incinération.

Toujours selon cette étude, cette méthode présente un impact environnemental favorable.

La combustion des boues de désencrage constitue une alternative attirante. En effet, l'industrie canadienne des pâtes et papiers achetait, en 1990, 48% de son énergie, le 52% restant était autogénéré. L'énergie achetée représente environ 18% du coût d'opération des usines de papier journal et environ 6% pour les usines de pâte commerciale (31). La combustion des boues permettrait non seulement de réduire le volume des boues de 70 à 80% (11), dépendant de la quantité de matière organique, mais également de récupérer de l'énergie sous forme de chaleur, réduisant ainsi les coûts d'opération et la dépendance énergétique des usines de pâtes et papiers. On considère que la combustion de boues à 40 à 50% de matières solides permet de récupérer jusqu'à 7000 kJ/kg (8). Les cendres résultants de la combustion doivent cependant être caractérisées pour déterminer leur concentration en métaux lourds et on devra trouver des moyens d'en disposer de façon sécuritaire. Les méthodes de combustion des boues seront décrites plus en détails à la section 3.3.

#### ***E) Autres méthodes de valorisation des boues***

Les boues primaires et de désencrage, de par leur composition, sont très intéressantes pour les projets de réhabilitation des lieux dégradés comme les sites d'enfouissement, les sablières, les sites miniers etc. Il existe de nombreux exemples de telles réhabilitations (32,33).

Une usine située en Belgique a expérimenté plusieurs technologies permettant de transformer les 40 à 60 tonnes de boues qu'elle produit chaque jour en éthanol : hydrolyse acide et fermentation, hydrolyse enzymatique et fermentation et conversion microbienne de la cellulose (34). Les charges minérales présentes dans les boues ont causé une perte de rendement lors de l'hydrolyse acide. L'hydrolyse enzymatique et la conversion microbienne, plus spécifiques, ne rencontraient pas ces problèmes, à condition que les boues soient stérilisées.

La pyrolyse sous vide permet de transformer les boues de pâtes et papiers en gaz, en huiles combustibles et en charbon. Des essais ont été effectués sur les boues primaires d'une usine produisant 4 tonnes à l'heure de boues à 10% de

consistance. Les boues sont asséchées à l'aide d'une presse à bandes, d'une presse à sabot et d'un séchoir. La valeur énergétique des sous-produits, pour 1 kg de boues anhydre, est de 18 372 kJ alors que l'énergie consommée par le procédé est de 5 335 kJ pour un gain de 13 037 kJ (35).

Les boues contenant une grande proportion de fibres peuvent être recyclées à l'intérieur de pâte destinée à la production de papier ou de carton de qualité inférieures (36,37).

Les boues de désencrage à haut contenu en charges minérales peuvent être incorporées dans des matériaux de construction comme des briques, de la matière ignifuge pour panneaux fibreux et en mélange avec du ciment (38,39,40).

### **2.2.3 L'opinion publique**

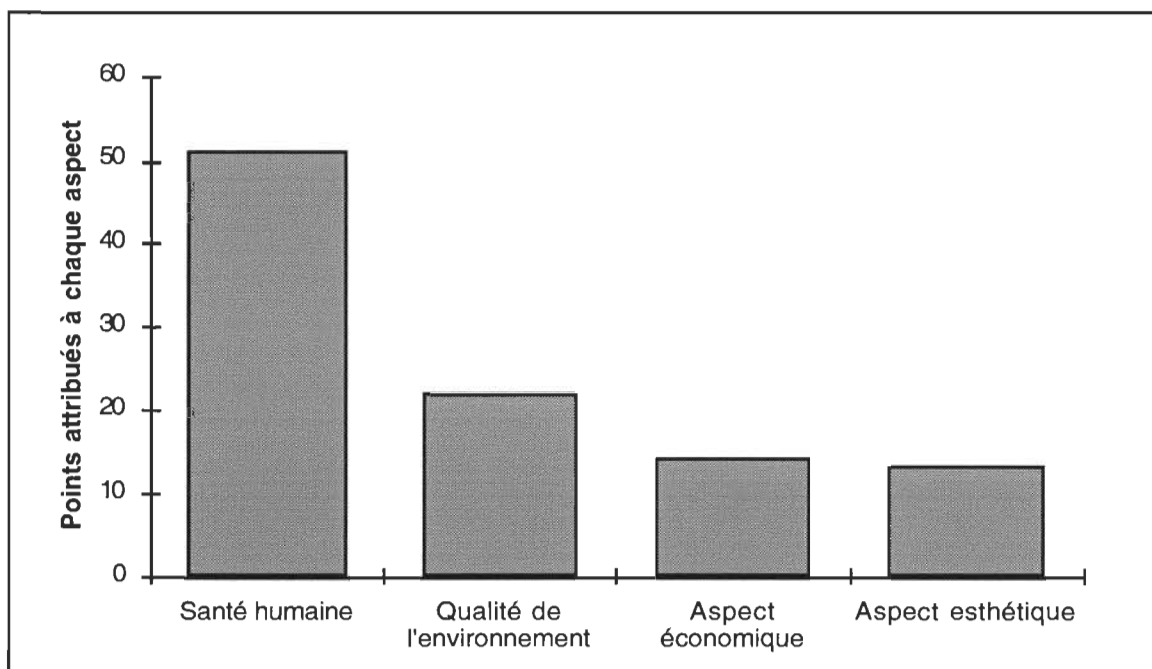
Un sondage effectué en 1986 auprès de résidents du Michigan (41) révèle que ceux-ci sont préoccupés par le problème que constitue la génération de boues mais la plupart d'entre-eux ne peuvent favoriser une méthode de valorisation. Cela est dû au fait que les avantages et les inconvénients ainsi que l'information technique concernant les différentes méthodes de valorisation leur sont inconnus.

Une large proportion des gens interrogés (87%) se sont montrés intéressés à connaître plus en détails les pratiques de gestion des boues.

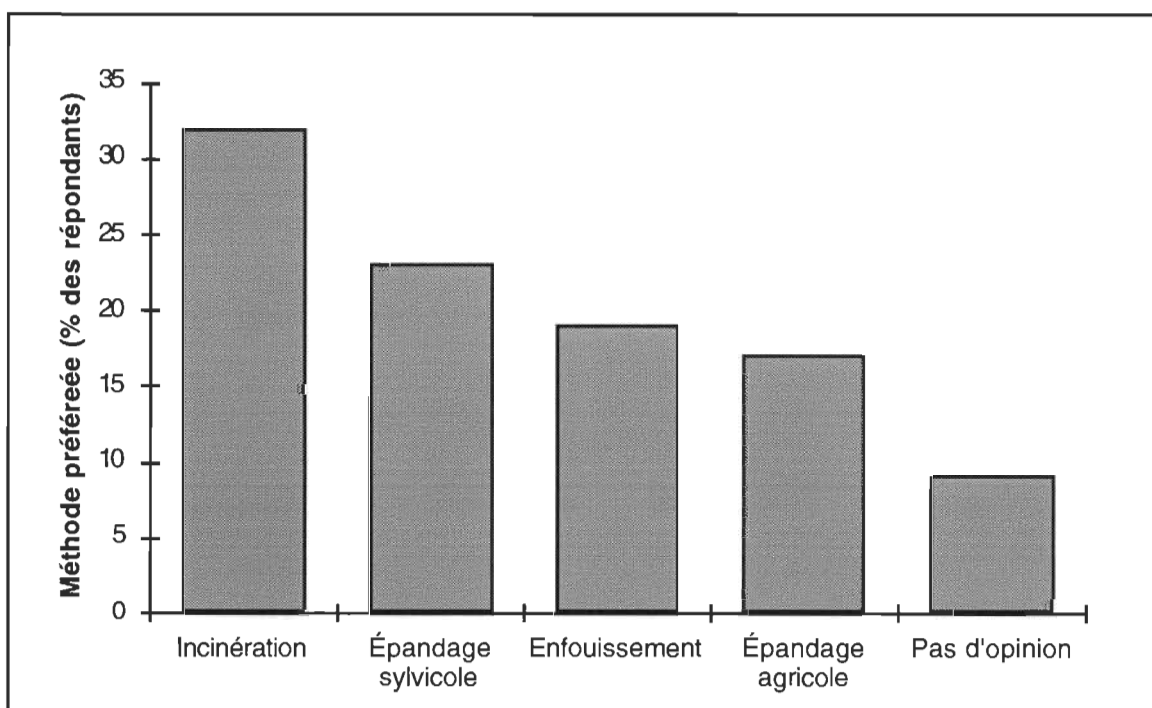
La Figure 2.5 montre l'importance que le public accorde aux différents aspects des méthodes de gestion des boues. On peut constater que la santé humaine et la qualité de l'environnement, avec près de 75% des points, précèdent l'aspect économique lorsque vient le temps d'appuyer une méthode de gestion des boues.

La Figure 2.6 classe ces méthodes par ordre de préférence du public. L'incinération (32%) constitue la méthode préférée du public malgré les risques associés aux gaz de combustion. Il est à noter que 9% des gens n'ont pas d'opinion.





**Figure 2.5** Importance accordé par le public à chaque aspect des méthodes de gestion des boues (41)



**Figure 2.6** Préférence du public pour chaque alternative de gestion des boues (41)

## CHAPITRE III

### LA COMBUSTION DES BOUES DE DÉSENCRAGE

#### 3.1 La solution : le séchage et la combustion des boues

Comme il a déjà été mentionné à la section 2.2.2, la valorisation énergétique ou combustion des boues constitue l'alternative la plus adéquate à l'enfouissement des boues de désencrage au Canada. D'après un sondage effectué auprès de 26 compagnies de pâtes et papiers canadiennes, l'incinération des boues de désencrage sera utilisée dans au moins 40% des usines pouvant avoir recours à cette technique d'ici cinq ans (31). Les résultats du sondage (Tableau 3.1) montrent que 14 des 26 compagnies interrogées utilisent ou prévoient utiliser la combustion des boues de désencrage d'ici cette échéance. Il est donc primordial de développer de nouvelles technologies de combustion des boues. De plus, la combustion des boues de désencrage est applicable à longueur d'année et ne dépend pas de systèmes biologiques élaborés qui sont souvent difficiles à maintenir en opération.

Les avantages reliés à la combustion des boues de désencrage sont nombreux. Tout d'abord, la combustion ne nécessite pas de transport, ce qui réduit non seulement les coûts de manutention des boues mais également l'impact négatif sur l'environnement découlant de la circulation de nombreux camions sur les routes. La combustion permet également de diminuer jusqu'à 85% le volume des boues, dépendant du contenu en matière organique. On a vu aussi que cette méthode diminuait la dépendance énergétique des usines de pâtes et papiers et réduirait les émissions de  $\text{SO}_2$  provenant des combustibles d'appoint utilisés pour brûler les boues non séchées. Bien que la valorisation énergétique des boues semble avantageuse, elle présente aussi quelques inconvénients. Premièrement, il y a possibilité d'émission de particules en suspension et de gaz polluants si la combustion est mal contrôlée. En effet, un pourcentage d'humidité trop élevé peut entraîner une combustion incomplète et l'émission de gaz polluants. De même, un pourcentage d'humidité trop faible (plus petit que 10%) peut causer l'émission de particules en suspension. La valorisation des boues par combustion requiert également un pressage à une consistance relativement élevée afin que le séchage



soit applicable de façon rentable. On doit aussi adapter ou installer des systèmes de séchage et de combustion dans les usines.

**Tableau 3.1 Nombre de compagnies utilisant ou intéressées à utiliser les nouvelles technologies dans le domaine des pâtes et papiers (31)**

Technologie	Nombre de compagnies				Intéressé à collaborer au dévelop.
	Utilisée	A l'intention d'utiliser la technologie d'ici...			
		1 an	3 ans	5 ans	
Traitement secondaire	19		4	3	2
Procédé à consistance moyenne	17 <sup>1</sup>		4	4	2
Pressage de la biomasse	10	4	3	3	2
Combustion en suspension (air)	10 <sup>2</sup>		1	2	-
Incinération des boues de désencrage	6	3	6	2	3
Désencrage du papier journal	4		4	6	1
Combustion par lit fluidisé	4		1	4	1
Blanchiment à l'oxygène	3		7	3	2
Raffinage à haute intensité	-		8	4	2
Blanchiment à l'ozone	-		4	9	5
Blanchiment Kraft en circuit fermé	-		1	2	2

1 Deux d'entre-elles ont indiqué un usage «partiel» de la technologie à consistance moyenne.

2 Une compagnie a indiqué un usage «partiel» de la combustion en suspension dans l'air.

Habituellement, les boues sont générées à une consistance de moins de 10%. Celle-ci peut être élevée à environ 40 à 50% selon le type de presse utilisé. Cependant, cette gamme de consistance n'est pas propice à la combustion si l'on désire que celle-ci s'entretienne d'elle-même (autocombustion). On doit encore diminuer la part en eau. Le séchage des boues permet d'augmenter la siccité (le contenu en matières solides) des boues jusqu'à 80, 90 ou même près de 100%. Le pressage des boues ne pose pas de problème car la plupart des usines sont déjà équipées de presses. C'est l'étape du séchage qui mérite une attention spéciale. En effet, il est primordial de bien déterminer le potentiel énergétique (chaleur de combustion) des boues en fonction de leur contenu en eau. Par la suite, il faut s'assurer que cette chaleur de combustion soit plus grande que l'énergie

consacrée au séchage des boues. Il faut donc trouver une technique de séchage des boues qui soit la plus économique possible.

### 3.2 Le conditionnement des boues

Le conditionnement des boues de désencrage en vue de leur combustion s'effectue en deux étapes : le pressage et le séchage.

#### 3.2.1 Le pressage des boues

Il existe plusieurs types de presses. Le choix d'une presse dépend de la composition des boues. Cependant, peu importe leur composition, on ne peut généralement pas presser les boues à plus de 50% de consistance étant donné que les fibres agissent comme une éponge et retiennent l'eau. Les charges retiennent également beaucoup d'eau. Le séchage est plus efficace pour retirer l'eau des boues à haut contenu en charges minérales. Les équipements de pressage les plus fréquemment utilisés sont les suivants (42):

**a) Épaississeurs à vis inclinée** : augmentent la consistance des boues de 4% à 12%. Leur efficacité peut aller jusqu'à 25% de consistance si les rejets pressés sont constitués principalement de plastique. Ils peuvent accepter occasionnellement des pièces de métal allant jusqu'à 5 à 10 cm de longueur sans subir de dommages.

**b) Presses à vis** : augmentent la consistance des boues de 10% à 40-50% en utilisant des vis à compression. Ils sont beaucoup plus dispendieux que les épaississeurs à vis inclinée et peuvent être endommagés facilement par des matières incompressibles.

**c) Presse à bandes à faible vitesse** : généralement utilisées pour épaissir les boues de clarificateur jusqu'à 20-30% de consistance. Leur coût relativement élevé et la fragilité des bandes aux pièces de métal et aux abrasifs les rendent moins attrayantes.

**d) Presses coniques** : augmentent la consistance des boues de 10% à 40-50%, selon le contenu en plastique. Elles sont également dispendieuses et peuvent être endommagées par des objets incompressibles.

**e) Presses à piston :** augmentent la consistance des boues de 5-10% à 35-45%. Ces presses sont peu sensibles aux abrasifs, aux objets de grande dimension. De plus, elles sont peu coûteuses.

### 3.2.2 Le séchage des boues

Les boues peuvent être séchées en vrac ou sous forme de pastilles pour augmenter la surface de contact avec l'air chaud. Le système le plus utilisé est le séchoir à air chaud (43). Les boues sont mélangées avec de l'air chaud provenant d'un brûleur au charbon ou à l'huile dans un long tube métallique. Les boues séchées sont récupérées à la sortie du tube pour être brûlées. Les lits séchants permettent aussi de sécher les boues. Ceux-ci consistent dans une couche de sable chauffée sur laquelle on dépose une mince couche de boues humides. Le mélange sable-boues est ensuite envoyé à l'enfouissement car il ne peut être brûlé (44). Dans une situation idéale, la chaleur provenant de la combustion des boues doit au moins suffire à sécher les boues humides, ce qui permet d'éliminer l'utilisation d'un combustible d'appoint pour le séchage.

### 3.2.3 L'unité pilote de séchage des boues

Le système de séchage des boues que nous avons décidé d'étudier est présenté à la Figure 3.1. Il s'agit d'une unité pilote de séchage des boues de la compagnie Barr & Murphy (Canada) Inc. fonctionnant selon le principe du séchoir rotatif. L'appareil est alimenté en boues humides à l'aide d'un tapis roulant à vitesse constante. Le débit d'alimentation est contrôlé par une trappe que l'on monte ou descend selon que l'on désire un débit plus ou moins grand. Les boues, une fois au bout du tapis roulant, franchissent une valve rotative qui maintient le système fermé. Un ventilateur permet de garder une pression négative à l'intérieur de l'appareil et d'entraîner les boues dans le système.

Les boues franchissent ensuite le désintégrateur : celui-ci consiste en une roue munie de six pales tournant à environ 6000 tours par minute qui réduit les boues en petits morceaux plus faciles à sécher vue leur plus grande surface de contact avec l'air chaud. C'est à cet endroit que les boues entrent dans la boucle de séchage.

Les boues se retrouvent dans un flux d'air chaud provenant d'un élément chauffant électrique réglable consommant 12,5 kW. Tant que les boues ne sont pas assez sèches, elles demeurent dans cette boucle. La séparation des boues sèches s'effectue sur la base de la densité dans le séparateur qui est une sorte de cyclone réglable. En effet, plus les boues sont sèches, plus leur densité est faible. Les boues sèches sont entraînées vers le centre du séparateur qui est muni d'un orifice menant à un cyclone et à la sortie du séchoir. Le débit d'air dans l'appareil est d'environ 1,6 m<sup>3</sup>/min.

#### ***a) Paramètres influençant le niveau de séchage des boues***

Deux paramètres peuvent influencer le degré de séchage des boues dans l'appareil : le débit d'alimentation et le degré de chauffe des éléments chauffants ou capacité thermique. Le débit de l'alimentation est réglé de façon à garder la température de sortie des boues constante, ce qui maintient au même niveau la chute de température entre l'entrée et la sortie de l'appareil. Ceci permet d'obtenir une siccité uniforme tout au long de la période d'opération.

On ne peut donc pas fixer le débit. On peut, tout au plus, calculer un débit moyen pour une certaine période d'opération. Il ne reste plus que la capacité thermique à faire varier pour obtenir différentes siccités finales.

### **3.3 La combustion des boues**

L'incinération d'un combustible solide contenant une certaine quantité d'eau, comme les boues de désencrage, s'effectue en trois étapes. Premièrement, l'eau contenue dans le combustible est évaporée, ensuite la matière solide est volatilisée pour ensuite être brûlée.

Il est important de maintenir une bonne turbulence à l'intérieur du dispositif de combustion afin d'assurer un mélange efficace de particules de boues en suspension et d'air de combustion. La matière organique est oxydée principalement en CO<sub>2</sub> et en vapeur d'eau. La présence de soufre et d'azote peut entraîner la formation de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub>. Finalement le charbon résiduel est brûlé à son tour (45). La Figure 3.2 schématise le processus de combustion.

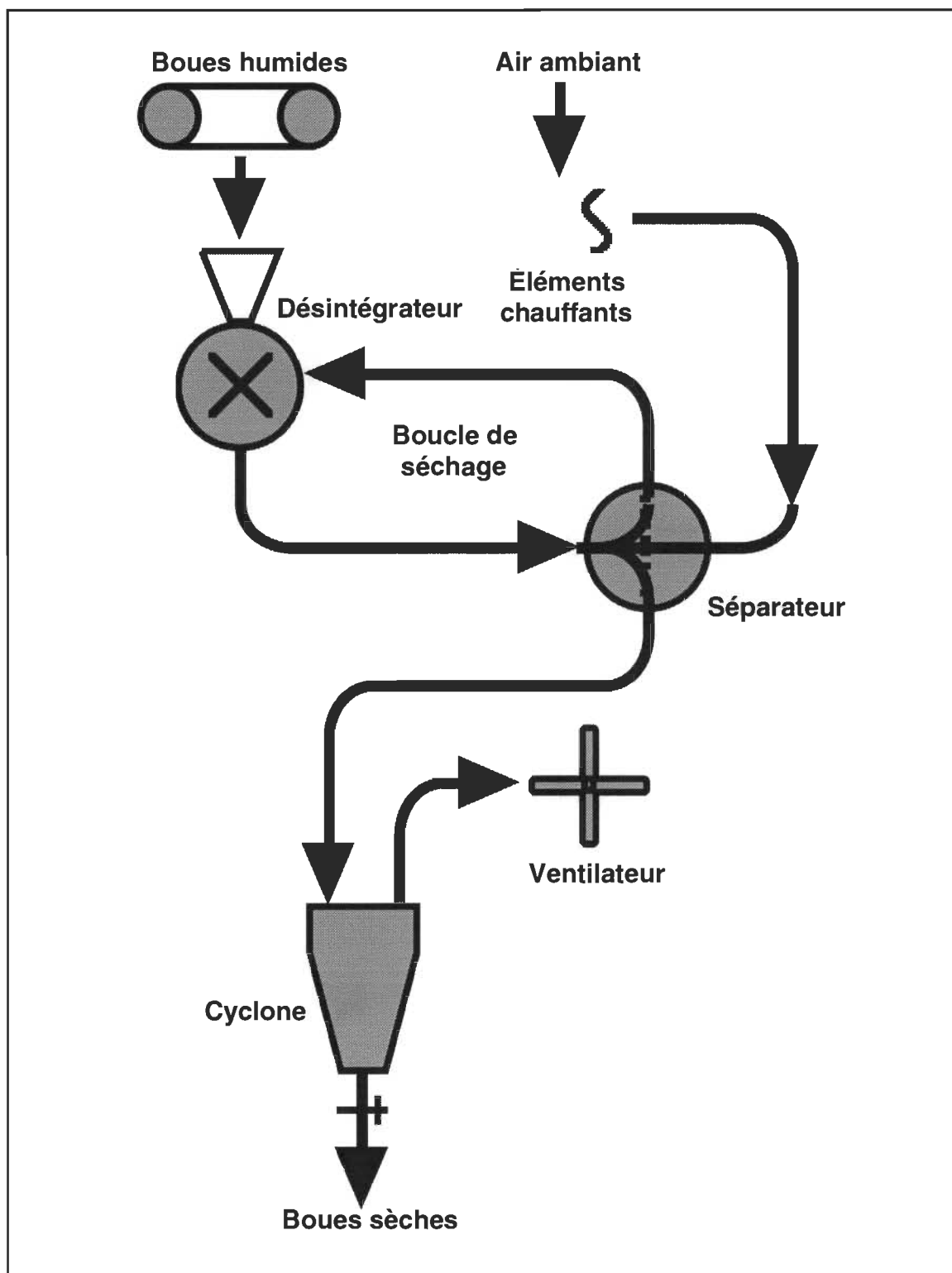


Figure 3.1 Schéma de l'unité pilote de séchage des boues

La quantité d'eau contenue dans le combustible influence grandement l'efficacité de la combustion.

Un combustible contenant plus d'humidité abaisse la température de combustion, ce qui réduit substantiellement la quantité de chaleur récupérable et augmente les émissions de gaz. Lorsque l'on ne sèche pas les boues, on procède généralement à leur combustion en les mélangeant à des écorces pour limiter l'effet de l'humidité.

La Figure 3.3 montre l'influence de l'augmentation de l'humidité du combustible sur la température de combustion. Par exemple, une augmentation de 5% de l'humidité cause une baisse de 55°C de la chaleur de la zone de combustion.

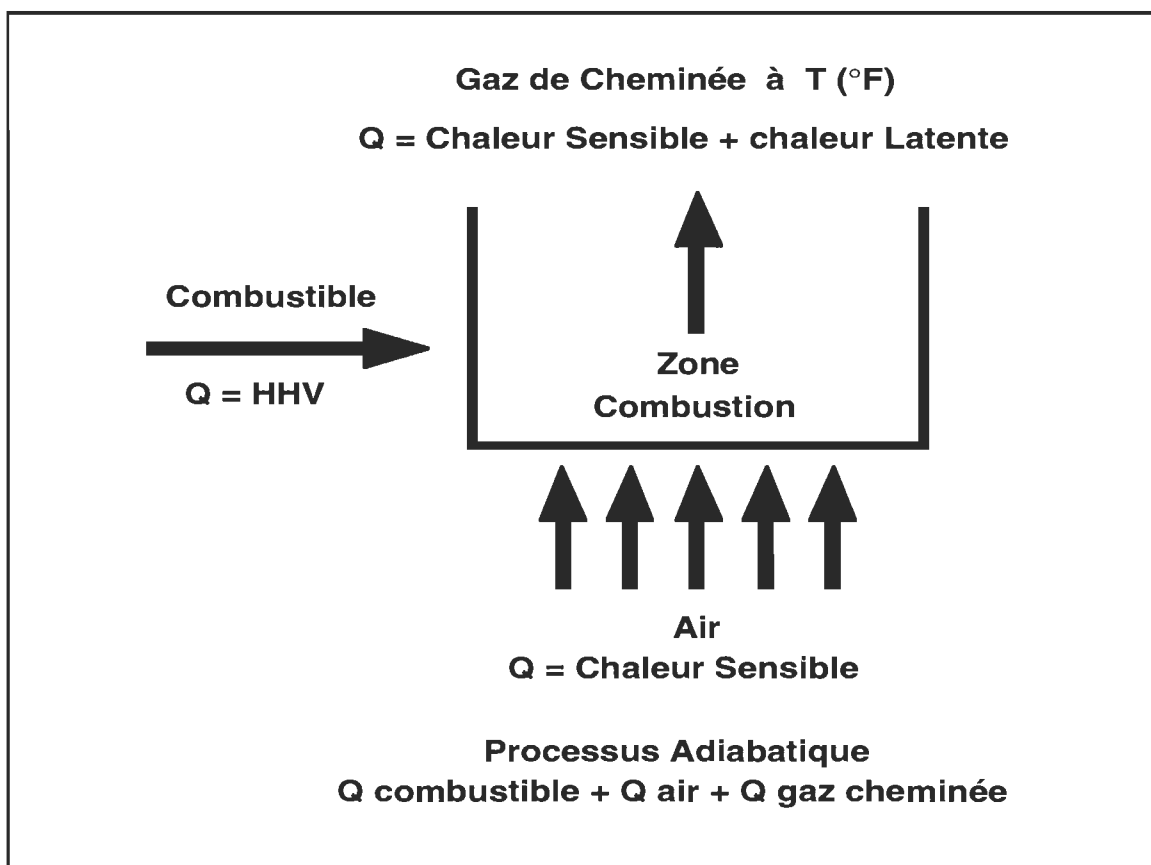
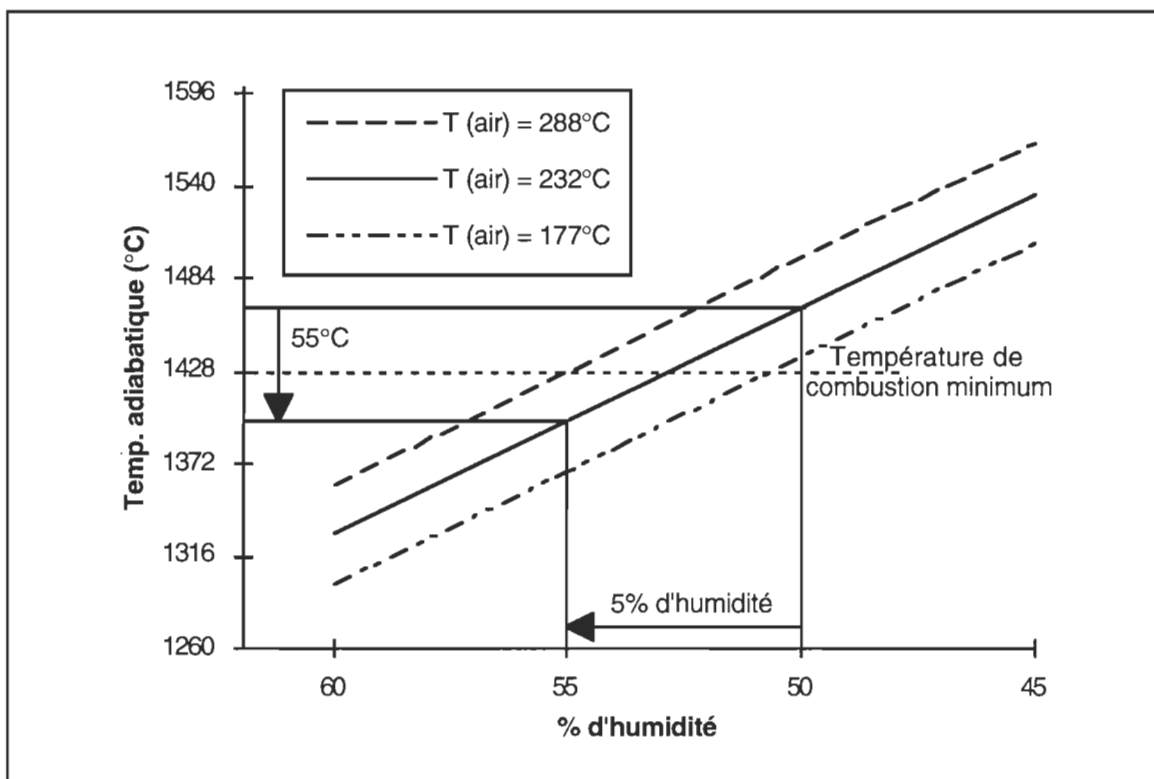


Figure 3.2 Processus de combustion simplifié (46)



**FIGURE 3.3 Effet de l'humidité sur la température de la zone de combustion (46)**

#### **a) Réutilisation des cendres**

Les résidus de combustion sont constitués en grandes parties des charges inorganiques: carbonate de calcium, glaises, etc. Des études ont été effectuées pour évaluer la possibilité de réutiliser ces cendres dans la fabrication du papier et de comparer leur propriétés avec celles des additifs traditionnels (47,48,49).

On observe généralement des modifications de la structure des constituants des cendres comme un jaunissement par rapport aux glaises utilisées dans la fabrication du papier et une augmentation de l'abrasivité.

Ces modifications peuvent être évitées en séparant les charges des boues séchées avant la combustion. La réutilisation des cendres dans le papier ou le ciment réduirait presque à zéro les résidus de combustion.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour effectuer la combustion des boues de désencrage soit à haute ou à basse consistance. Les méthodes de

combustion des boues se divisent en trois catégories : les treillis mobiles, les lits fluidisés et l'oxydation humide.

### **3.3.1 Treillis mobiles (Travelling grate)**

Les boues peuvent être incinérées dans des bouilloires conventionnelles à l'aide d'un treillis mobile en les mélangeant avec des écorces ou des copeaux. Un mélange contenant un maximum de 15% de boues peut être utilisé sans que des problèmes comme la réduction de la production de vapeur et l'augmentation des émissions de particules en suspension et de l'opacité ne se manifestent (50).

Cette solution n'est pas idéale car ces systèmes n'ont pas été conçus pour brûler ce genre de déchets. Des changements peuvent être apportés pour les adapter à la combustion des boues comme l'ajout de presses et d'un séchoir (31).

### **3.3.2 Lits fluidisés**

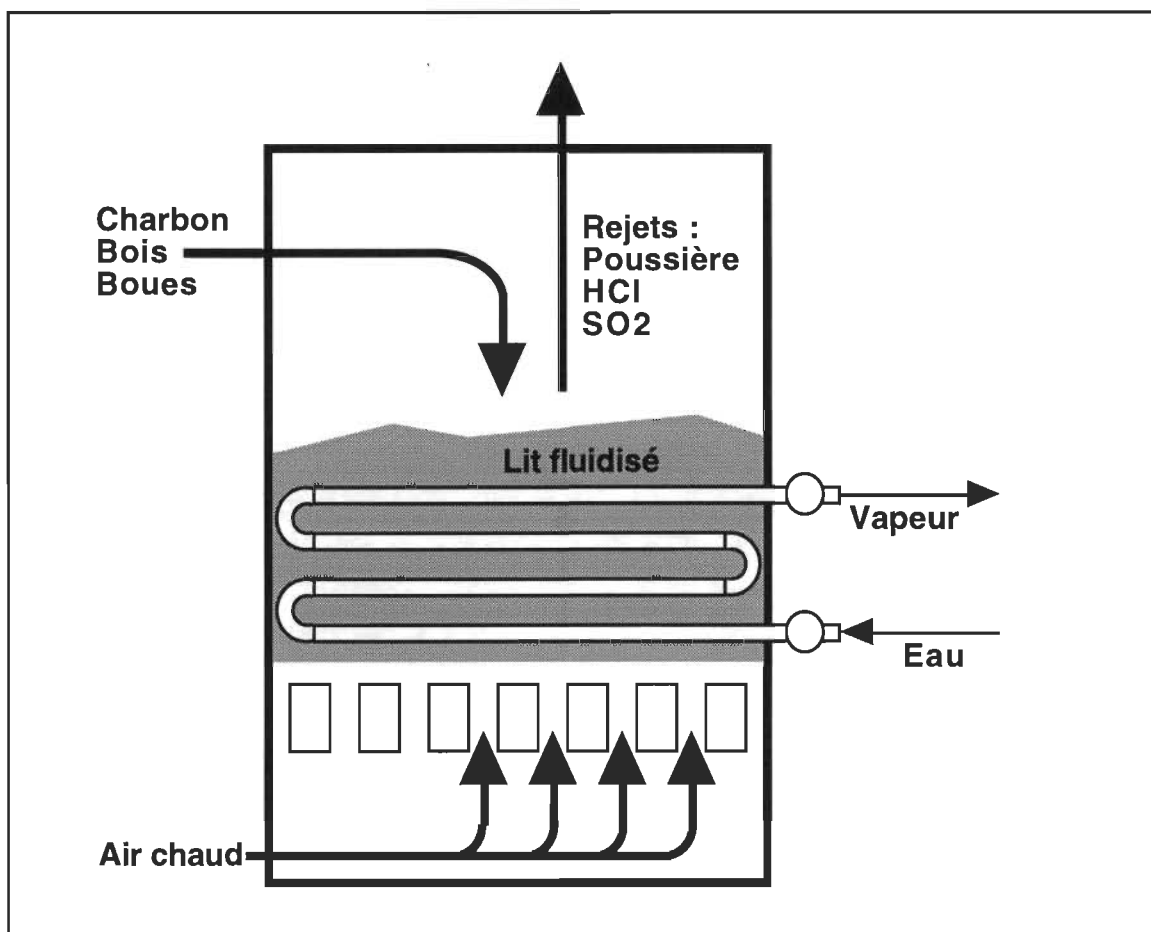
Les lits fluidisés se définissent comme suit : un lit de particules solides (sable) chauffé intensément est fluidisé en le traversant de jets d'air de combustion; la vélocité de l'air crée un effet d'entraînement qui élimine les forces de contact solide-solide et les particules solides peuvent se déplacer librement dans l'air (1).

Le système de combustion par lits fluidisés est schématisé à la Figure 3.4. Le lit fluidisé possède les propriétés physiques d'un fluide et ressemble à un récipient d'eau bouillante. La combustion se produit dans la zone fluide, de 70 à 115 cm au-dessus du lit. Le système produit une combustion stable et peut être utilisé en continu. Plusieurs exemples d'utilisation de lits fluidisés ont été publiés (1,51,52).

Les avantages de cette méthode sont nombreux: efficacité de combustion très élevée (moins de 1% de carbone non brûlé), stabilité de combustion améliorée, températures de combustion plus basses, possibilité de capter les émissions de soufre par l'ajout de pierre à chaux, entretien peu coûteux et flexibilité de carburant; cependant les coûts d'investissement sont élevés.

La combustion par lit fluidisé permet également de rencontrer de façon économique les nouvelles réglementations environnementales sur les émissions de gaz (aux États-Unis, le Clean Air Act de 1990) (1).





**Figure 3.4** Schéma d'un système de combustion des boues par lit fluidisé.

### 3.3.3 Oxydation humide

L'oxydation humide est utile lorsque l'on veut effectuer la combustion de boues à haute teneur en cendres et à faible valeur calorifique sans pressage. La méthode consiste dans l'oxydation de la matière organique des boues par l'oxygène de l'air en phase liquide à haute pression. Un mélange d'air et de boues à basse consistance (4-8%) est chauffé et ensuite dirigé vers un réacteur (400-500°C) dans lequel l'oxydation se produit. Une pression d'environ 1266 kg/m<sup>2</sup> (1 800 psi) est nécessaire pour conserver le système à l'état liquide.

La réaction d'oxydation est exothermique si bien que la chaleur récupérée sert à chauffer les boues avant leur entrée dans le réacteur et à produire de la vapeur utilisée dans l'usine (53)

Le système d'oxydation humide permet de traiter les boues à basse consistance, ce qui élimine les problèmes de pressage des boues, et de récupérer la chaleur produite par la réaction d'oxydation. Les très hautes pressions nécessaires au fonctionnement requièrent l'emploi de soudures et de matériaux de construction spéciaux qui augmentent le coût d'installation. L'entretien est également coûteux et le système ne peut être utilisé en continu comme les lits fluidisés.

### **3.4 Objectifs poursuivis**

La technologie la plus appropriée pour la valorisation des boues de désencrage dans le contexte canadien consiste en un pressage à haute consistance suivi d'une incinération (31). Étant donné que le pressage des boues à plus de 50% de consistance est peu envisageable et que la chaleur de combustion des boues à cette consistance ne présente pas d'avantage énergétique, il est essentiel d'examiner la possibilité de sécher les boues avant de procéder à leur combustion. Le séchage des boues sur une unité pilote de laboratoire sera donc étudiée plus en détails afin de déterminer les gains possibles d'énergie résultants de la différence entre l'énergie nécessaire au séchage des boues et l'énergie dégagée lors de la combustion des boues séchées. L'accent sera mis sur la transformation d'un rejet en source d'énergie par la récupération de la chaleur dégagée par leur combustion. Les objectifs suivants seront poursuivis:

- Caractérisation des boues de désencrage de papier journal et de papiers fins;
- Détermination de la chaleur de combustion de ces boues en fonction de leur contenu en eau et de leur contenu en charges minérales ;
- Détermination des conditions de séchage des boues sur l'unité pilote ;
- Essais de séchage des boues aux conditions optimales à l'aide d'une unité pilote;
- Détermination du bilan énergétique (Énergie de combustion - Énergie de séchage) pour chaque type de boues ainsi que pour des mélanges de boues.

## **CHAPITRE IV**

### **MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE**

#### **4.1 Échantillonnage**

L'échantillonnage des boues de désencrage s'est effectué dans trois usines que l'on appellera A, B et C (Tableau 4.1). L'usine A effectue le désencrage d'un mélange de vieux papiers dans des proportions d'environ 80 % papier journal et 20 % magazine et produit de la pâte recyclée destinée à être intégrée dans la fabrication de papier journal. Les échantillons, d'un volume de 20 L, ont été prélevés à trois journées différentes soit les 7 et 8 novembre 1994 et le 28 février 1995. Ceux-ci étaient prélevés à la sortie de la presse à boues. Lors des deux premières visites, on a aussi prélevé un échantillon de 1 L d'effluents de la presse à boues. L'usine B recycle des vieux papiers de bureau ainsi que des retailles et des rejets d'imprimerie pour produire des papiers fins (mouchoirs, papier de toilette, etc.). Les échantillons ont été prélevés de la même manière qu'à l'usine A les 29 et 30 novembre 1994 et le 28 février 1995. Quant à l'usine C, celle-ci n'est pas une usine de désencrage mais produit du carton à partir de fibres vierges. Elle a été échantillonnée une seule fois le 13 mai 1995. On y a prélevé des échantillons de boues primaires pressées qui ont servis à faire des mélanges avec les boues de désencrage lors des essais de séchage sur l'unité pilote.

#### **4.2 Caractérisation des boues**

Les analyses suivantes ont été effectuées sur les boues des usines A, B et C afin de déterminer leur composition. Tout d'abord, on a déterminé la siccité des boues, leur contenu en cendres et en matières combustibles. Par la suite, afin de connaître les composants plus minoritaires des boues, on a effectué un dosage des acides gras et des acides résiniques susceptibles de se retrouver dans un système de désencrage. On a dosé un total de 8 acides gras et 11 acides résiniques. Ces deux familles de composés ont été dosées à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse. Le noir de carbone, le pigment de l'encre noire, a été déterminé par analyse thermogravimétrique. Quant aux métaux, ils ont été déterminés par absorption

atomique. Une série de 18 métaux caractéristiques des pâtes et papiers, associés aux charges minérales ont été déterminés.

**Tableau 4.1 Plan d'échantillonnage**

Usine	Date	Effluents	Boues pressées
A	7/11/1994	1 L	1 kg
	8/11/1994	1 L	1 kg
	28/02/1995	x	50 kg
B	29/11/1994	1 L	1 kg
	30/11/1994	1 L	1 kg
	28/02/1995	x	100 kg
C	10/05/1995	x	15 kg
	13/06/1995	x	15 kg

#### 4.2.1 Analyse préliminaire

Le pourcentage de matière solide dans les boues a été déterminé en plaçant quatre échantillons de boues humides dans un four à 104°C pendant 12 heures. La moyenne des rapports de masse finale sur la masse initiale donne le pourcentage de matière solide.

Le pourcentage de cendres dans les boues a été déterminé en plaçant quatre échantillons de boues séchées dans un four à 510°C jusqu'à la formation de cendres blanches. La moyenne des rapports de masse finale sur la masse initiale de matière solide sèche donne le pourcentage de cendres. La différence entre le pourcentage de matière solide et le pourcentage de cendres donne le pourcentage de matière organique.

Afin de mieux cerner la présence de certains composés présents en grande quantité dans les boues comme les carbonates, une analyse thermogravimétrique des échantillons de boues a été effectuée. Les conditions d'analyse thermogravimétrique sont données à l'annexe I.

la machine à papier ou du système de désencrage. De plus, quelques encres contiennent encore des pigments à base de métaux lourds et évidemment des contaminants résultants de l'utilisation et de la manutention du papier peuvent être présents.

**Tableau 4.2 Les charges minérales dans le papier**

Élément	Provenance	Formule
Al	Kaolin (glaise)	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}^*$
Si	Kaolin, talc	-
Mg	Talc	$3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Zn	Sulfate de zinc	$\text{ZnSO}_4$
Ca	Carbonate de calcium	$\text{CaCO}_3$

\* La formule indiquée est celle de la kaolinite, le constituant principal du kaolin

La concentration des métaux présentés au Tableau 4.3 sera déterminée dans chaque échantillon par digestion acide et spectroscopie d'absorption atomique. Le Tableau 4.3 montre également le type de flamme utilisée pour le dosage de chaque métal. La méthode d'analyse des métaux est donnée à l'annexe II.

#### 4.2.3 Acides gras et résiniques

Certains acides gras et acides résiniques sont présents dans le bois avant la production du papier. D'autres acides gras proviennent du procédé de désencrage où ils sont utilisés comme surfactant pour faciliter l'élimination de l'encre. La méthode d'analyse des acides gras et résiniques dérivés avec BSTFA est donnée à l'annexe III.

Le Tableau 4.4 montre la liste des acides gras et résiniques dosés par cette méthode. Étant donné que la méthode d'analyse des acides gras et résiniques utilise un agent de dérivation, le BSTFA, et que certains acides gras sont présents dans les boues sous forme d'esters de méthyle ne se prêtant pas à la réaction de dérivation, les acides palmitique, linoléique, oléique et stéarique ont été également dosés sous leur forme ester de méthyle. La méthode d'analyse des acides gras et résiniques sous forme d'ester de méthyle est donnée à l'annexe III.

**Tableau 4.3 Métaux dosés dans les boues de désencrage et types de flammes utilisés**

Métal	Type de flamme*	
Aluminium	Oxyde nitreux-Acétylène	Réductrice
Arsenic	Air-Acétylène	Réductrice
Barium	Oxyde nitreux-Acétylène	Réductrice
Calcium	Air-Acétylène	Oxydante
Chrome	Air-Acétylène	Réductrice
Cobalt	Air-Acétylène	Oxydante
Cuivre	Air-Acétylène	Oxydante
Fer	Air-Acétylène	Oxydante
Lithium	Air-Acétylène	Oxydante
Magnésium	Air-Acétylène	Oxydante
Manganèse	Air-Acétylène	Oxydante
Mercure	Air-Acétylène	Oxydante
Molybdène	Oxyde nitreux-Acétylène	Réductrice
Nickel	Air-Acétylène	Oxydante
Potassium	Air-Acétylène	Oxydante
Sodium	Air-Acétylène	Oxydante
Silicium	Oxyde nitreux-Acétylène	Réductrice
Zinc	Air-Acétylène	Oxydante

#### 4.2.4 Paramètres physico-chimiques

Le pH et la conductivité sont mesurés directement sur le filtrat des boues. La conductivité est mesurée avec un conductivimètre CDM 83 et une électrode à conductivité CDC 304 adaptée pour des mesures sur des suspensions de pâtes de Radiometer Copenhagen.

La matière organique présente dans le filtrat des boues est dosée à l'aide de méthodes standardisées (DBO<sub>5</sub> et DCO) et utilisées par l'APHA (American Public Health Association) et le Ministère de l'environnement du Québec.

**Tableau 4.4 Acides gras et résiniques dosés dans les boues de désencrage**

Acides gras	Acides résiniques
Acide laurique	Acide pimarique
Acide myristique	Acide sandaracopimarique
Acide palmitique	Acide isopimarique
Acide linoléique	Acide palustrique
Acide oléique	Acide lévopimarique
Acide stéarique	Acide déhydroabiétique
Acide 9,10-dichlorostéarique	Acide abiétique
	Acide néoabiétique
	Acide chlorodéhydroabiétique
	Acide dichlorodéhydroabiétique

### 4.3 Chaleur de combustion des boues

La chaleur de combustion des boues constitue un point essentiel de notre étude. Elles a été déterminée à l'aide d'une bombe calorimétrique à l'oxygène. Afin de pouvoir déterminer la chaleur de combustion en fonction du contenu en humidité des boues, nous avons fait varier la siccité des boues. La chaleur de combustion des échantillons pour trois différentes siccité a été déterminée. La première valeur de siccité étudiée correspondait à la valeur minimale pour une combustion sans aide à la mise à feu. Cette siccité de même que la seconde ont été obtenue par pressage des boues sur une presse de laboratoire. Pour obtenir la troisième siccité, on séchait les boues à l'air ambiant pendant environ 12 heures, ce qui permettait d'obtenir une siccité stable d'environ 96 à 98%.

La méthode utilisée pour l'analyse des échantillons de boues à l'aide de la bombe calorimétrique à l'oxygène est présentée à l'annexe IV. Le Tableau 4.5 montre les siccités utilisées pour les trois usines étudiées.

La chaleur de combustion des boues en fonction de leur contenu en charges a été mesurée en calculant la chaleur de combustion des boues à une même siccité pour les trois types de boues à l'aide des courbes de chaleur de combustion en fonction de la siccité.

**Tableau 4.5 Siccités utilisées pour les mesures de chaleur de combustion**

<b>Usine</b>	<b>Siccité 1 %</b>	<b>Siccité 2 %</b>	<b>Siccité 3 %</b>
A	51	79	96
B	76	91	97
C	55	69	98

#### **4.4 Séchage des boues sur unité pilote**

##### **4.4.1 Détermination des conditions d'opération sur l'unité pilote**

Afin de déterminer les conditions d'opération sur l'unité pilote, on a procédé au séchage des boues de l'usine A à six capacités thermiques différentes (Tableau 4.6). Les essais ont été effectués en continu sur une période de 30 minutes et chacun d'entre-eux a été répété deux fois, sauf l'essai à 70% qui a été répété trois fois.

**Tableau 4.6 Détermination des conditions d'opération sur l'unité pilote**

<b>Capacité thermique %</b>	<b>Temps d'opération min.</b>	<b>Énergie de séchage* kJ</b>
0	30	0
10	30	2 250
20	30	5 500
30	30	6 750
50	30	11 250
70	30	15 750

\* Par exemple : 30 % x 1 800 s x 12,5 kW = 6 750 kJ

On a récupéré les boues séchées à toutes les cinq minutes, ainsi qu'un échantillon des boues humides pour obtenir la siccité initiale. La siccité des boues à chacun des temps d'échantillonnage est déterminée en mesurant la siccité de trois échantillons de boues séchées, pour un total de 18 échantillons par essai. Ces essais nous ont permis de déterminer la capacité thermique qui sera utilisée pour effectuer les essais de séchage des boues et des mélanges de boues.

##### **4.4.2 Essais de séchage des boues**

Une fois les conditions d'opération déterminées, on a procédé au séchage



des boues des usines A, B et C à ces conditions (Tableau 4.7). On a de plus procédé au séchage de deux mélanges typiques de boues. Un mélange contenant 20% de boues provenant des usines A ou B avec 80% de boues provenant de l'usine C qui, rappelons-le, consistent dans des boues primaires de production de carton. Ces proportions représentent ce que l'on pourrait retrouver dans une usine de pâtes et papiers possédant des machines à papier traditionnelles utilisant des fibres vierges et recyclées ainsi qu'un système de désencrage. Les essais ont été effectués de la façon suivante: chaque essai dure 30 minutes et les boues séchées sont prélevées à toutes les cinq minutes à la sortie de l'unité pilote. Chaque essai est répété deux fois. La siccité des boues à chacun des temps d'échantillonnage est déterminée en mesurant la siccité de trois échantillons de boues séchées, pour un total de 18 échantillons par essai.

**Tableau 4.7 Séchage des boues et des mélanges sur l'unité pilote**

<b>Échantillon séché</b>	<b>Composition</b>
Usine A	Boues seules
Usine B	Boues seules
Usine C	Boues seules
Mélange I	Usine A (20%)-Usine C (80%)
Mélange II	Usine B (20%)-Usine C (80%)

## CHAPITRE V

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 5.1 Caractérisation des boues de désencrage

La caractérisation des paramètres physico-chimiques des boues dont les résultats sont présentés au Tableau 5.1 a été effectuée sur l'effluent de la presse à boues. Celle-ci permet de constater que le pH des boues des usines A et B est neutre. La conductivité de l'effluent de la presse à boues de l'usine A est plus élevée que celui de l'usine B ce qui nous indique une plus grande concentration de métaux solubles dans l'eau à pH neutre dans les boues de l'usine A. Les résultats de DBO et de DCO sont relativement élevés étant donné qu'ils ont été effectués sur les effluents non filtrés qui renferment beaucoup de fibres courtes.

**Tableau 5.1 Paramètres physico-chimiques des boues de désencrage**

Échantillon	pH	Conductivité (mS/cm <sup>2</sup> )	DBO (mg/L)	DCO (mg/L)
A-1	6,3	3,03	2000	10850
A-2	6,3	4,34	2815	12720
A-3	-	-	-	-
<b>Moyenne</b>	<b>6,3</b>	<b>3,69</b>	<b>2408</b>	<b>11785</b>
B-1	6,5	2,40	x	2070
B-2	6,4	2,49	x	5580
B-3	-	-	-	-
<b>Moyenne</b>	<b>6,5</b>	<b>2,45</b>		<b>3825</b>

Les boues de l'usine A ont un contenu en eau moyen de 48,7% alors que celles des usines B et C ont un contenu en eau moyen de 63,3% et 61,4% (Tableau 5.2). Cette différence est due au fait que l'usine A utilise une presse à vis alors que l'usine B utilise plutôt une presse à bandes, moins efficace. Le contenu en fibres influence également l'enlèvement de l'eau : lors du pressage, les fibres agissent comme une éponge et retiennent une plus grande quantité d'eau que d'autres constituants comme les charges minérales. On peut observer ce

phénomène sur les boues de l'usine C constituées de fibres à près de 100% sur une base sèche et qui sont pressées à une siccité moyenne de 38,6%.

Deuxième point de divergence entre les boues des usines A et B, le contenu en matières combustibles qui est de 34,4% pour l'usine A et 15,8% pour l'usine B. On doit donc s'attendre à ce que la chaleur de combustion des boues de l'usine B soit à peu près la moitié de celles de l'usine A. Les boues de l'usine C qui sont constituées de matière combustible à près de 100% devraient posséder une chaleur de combustion assez élevée.

**TABLEAU 5.2 Composition des boues de désencrage**

	<b>Usine A (% b.s.)</b>	<b>Usine B (% b.s.)</b>	<b>Usine C (% b.s.)</b>
Eau	49,0	63,6	61,4
<b>Combustible</b>			
AGR	0,8	0,1	nd
Noir de carbone	0,8	0,7	-
Fibres + autres	31,8	15,8	37,6
<b>Non combustible</b>			
Carbonates	-	3,3	-
Autres	17,6	16,6	1,0
Total	100,0	100,0	100,0

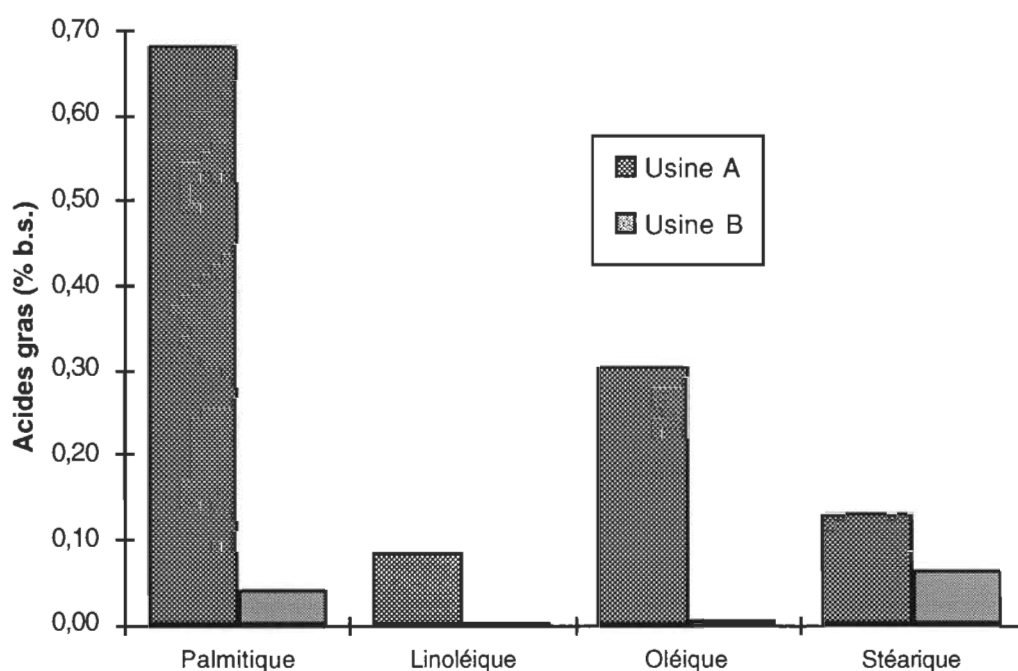
Autre différence, les cendres qui représentent 17,0% des boues de l'usine A et 20,9% des boues de l'usine B si l'on considère les carbonates comme non combustibles. Le point de fusion du carbonate de calcium est d'environ 700°C.. Cette différence peut sembler faible, mais lorsqu'on considère les boues sèches, celles de l'usine A contiennent 34% de cendres tandis que celles de l'usine B en contiennent 53%, incluant les carbonates. La réduction de poids et de volume sera donc plus grande lors de la combustion des boues de l'usine A.

Finalement, parmi les composés plus minoritaires analysés sur les boues des usines A et B seulement, on trouve le noir de carbone, le pigment d'encre noire, qui représente 0,8 et 0,7% des boues des usines A et B respectivement ainsi

que les acides gras et résiniques (AGR) qui représentent 0,8 et 0,1% des boues pour les usines A et B respectivement.

### **A) Acides gras et résiniques**

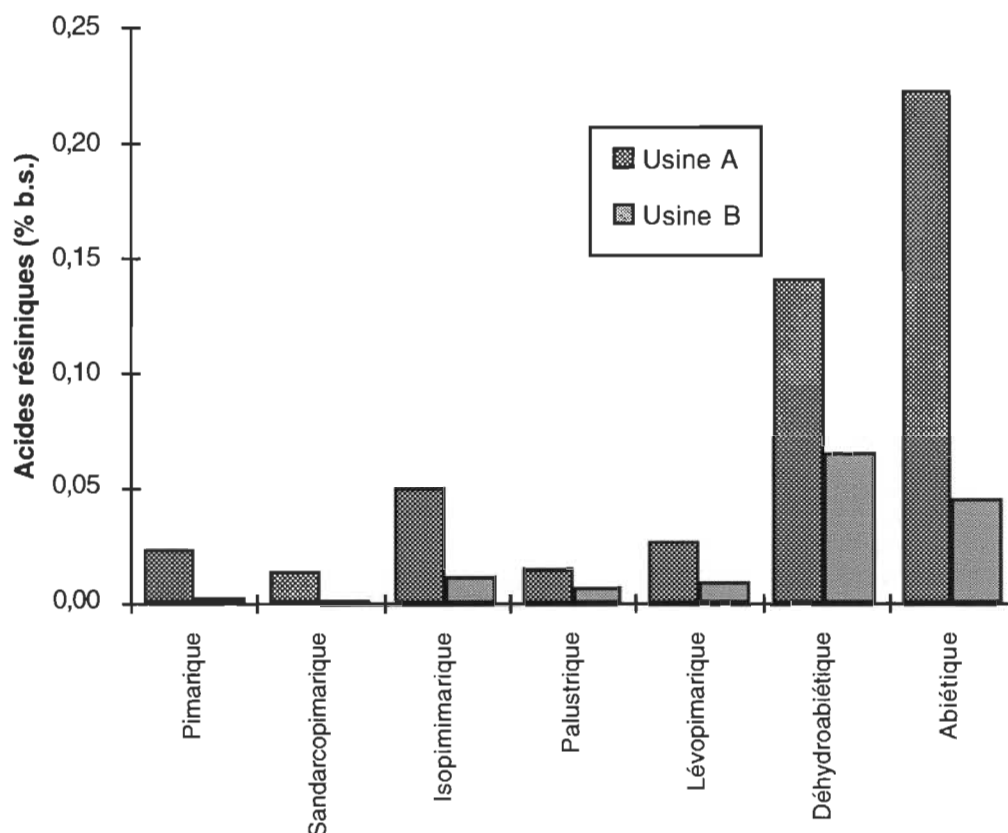
Parmi les 8 acides gras dosés, les quatre principaux au niveau de la concentration sont les acides palmitique, linoléique, oléique et stéarique comme le montre la Figure 5.1. Le résultat reporté ici représente le total des acides gras sous forme acide et sous forme d'esters de méthyles. Les acides gras représentent 1,5% des boues de l'usine A et 0,1% des boues de l'usine B. Les acides palmitiques, oléiques et stéariques sont caractéristiques des acides gras utilisés comme surfactants dans les systèmes de flottation. Ces mêmes acides gras peuvent aussi provenir du bois, notamment l'acide linoléique. Les acides gras sont des composés toxiques; la combustion des boues permet d'éliminer cette toxicité.



**Figure 5.1 Contenu des boues des usines A et B en acides gras**

La Figure 5.2 montre la concentration des acides résiniques qui représentent 0,51% des boues de l'usine A et 0,13% des boues de l'usine B. Ceux-ci proviennent essentiellement du bois utilisé dans la fabrication du papier. Parmi les 11 acides résiniques dosés dans les boues de désencrage, les principaux sont les

acides abiétique et déhydroabiétique. Il faut toutefois prendre en considération le fait que les acides palustrique, lévopimarique et néoabiétique s'isomérisent principalement en acide abiétique, ce qui augmente la concentration de ce dernier (54). Les acides résiniques sont reconnus comme étant particulièrement toxiques, principalement l'acide déhydroabiétique, les autres étant de toxicité similaire (55). Il est encore une fois bon de noter que la combustion des boues élimine cette toxicité.

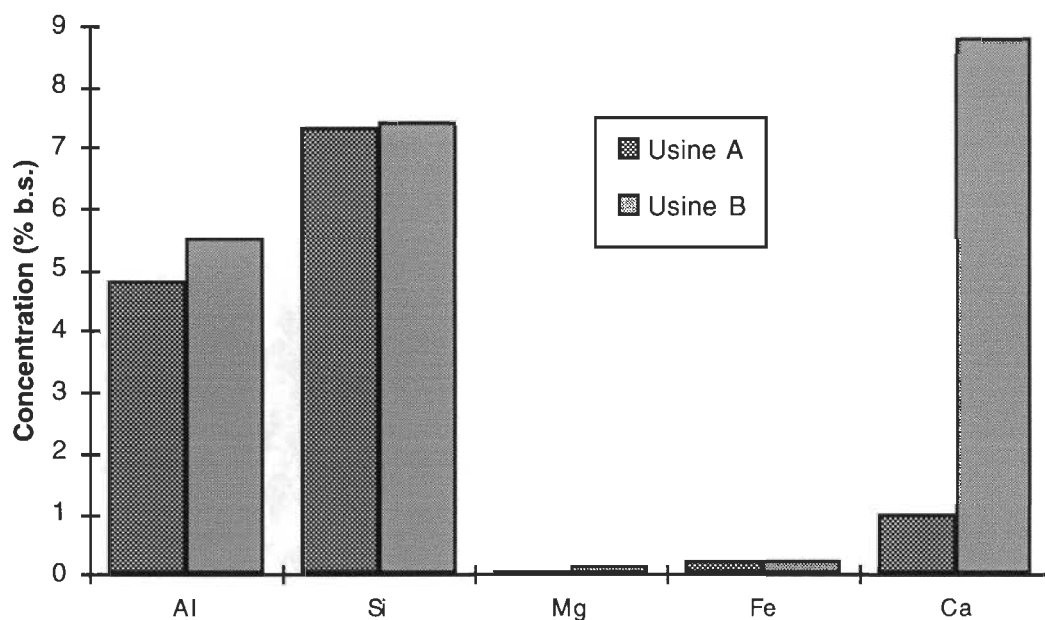


**FIGURE 5.2 Contenu des boues des usines A et B en acides résiniques**

### ***B) Charges minérales***

La Figure 5.3 montre le pourcentage de charges minérales dans les boues des usines A et B. Notre analyse nous a démontré une très grande proportion d'aluminium et de silicium dans chacune des boues. En effet, les boues de l'usine A contenait 4,8% d'aluminium et les boues de l'usine B en contenait 5,5%.

En ce qui concerne le silicium, on en retrouvait 7,3% dans les boues de l'usine A et 7,4% dans celles de l'usine B. Ces deux métaux sont associés au kaolin (ou glaise), un additif souvent utilisé dans les papiers dans lequel ils sont présents en proportions égales (voir Tableau 4.2). La présence de silicium en plus grande quantité que l'aluminium peut donc aussi nous indiquer que l'on retrouve du talc dans les boues. Le talc est un autre additif utilisé dans la fabrication du papier. Celui-ci consiste dans un mélange d'oxydes de silicium et de magnésium (voir Tableau 4.2). Cependant, la quantité de magnésium retrouvée dans les boues des usines A et B est minime et on peut conclure que le silicium se retrouve principalement sous forme de glaise, le reste étant sous une autre forme, comme  $\text{SiO}_2$ .



**Figure 5.3 Charges minérales dans les boues des usines A et B.**

Le fer, qui n'est pas un additif du papier mais qui est quand même présent en grande quantité dans les boues analysées, provient des diverses pièces métalliques du système de désencrage et des rebuts que l'on retrouve dans le papier.

Le calcium provient principalement de deux sources. La première est le carbonate de calcium, présent surtout dans les boues de l'usine B, comme on l'a vu

précédemment lors de l'analyse thermogravimétrique. L'autre source de calcium consiste dans les savons d'acides gras utilisés à l'étape de flottation comme surfactant. Ces savons sont la plupart du temps des sels de calcium d'acides gras comme l'acide palmitique et l'acide oléique que l'on a déjà identifié dans les boues.

### **C) Autres métaux**

Les résultats de l'analyse des autres métaux sont montrés au Tableau 5.3. Afin de nous donner une idée de l'ordre de grandeur des concentrations des métaux analysés, on a ajouté les valeurs trouvées pour la moyenne de 34 stations d'épuration du Québec, donc des boues municipales (5).

À première vue, on constate que les concentrations de métaux dans les boues de désencrage sont toutes inférieures à celles des boues municipales et se retrouvent sous la barre des 20 ppm sauf en ce qui concerne l'arsenic et le molybdène. On voit aussi que le chrome, le plomb et particulièrement le cuivre (699 ppm) présents dans les boues municipales dépassent largement ce que l'on retrouve dans les boues de désencrage. Le seul métal non détectable parmi ceux que l'on a dosé est le mercure. La limite de détection était cependant de 20 ppm.

## **5.2 Chaleur de combustion des boues**

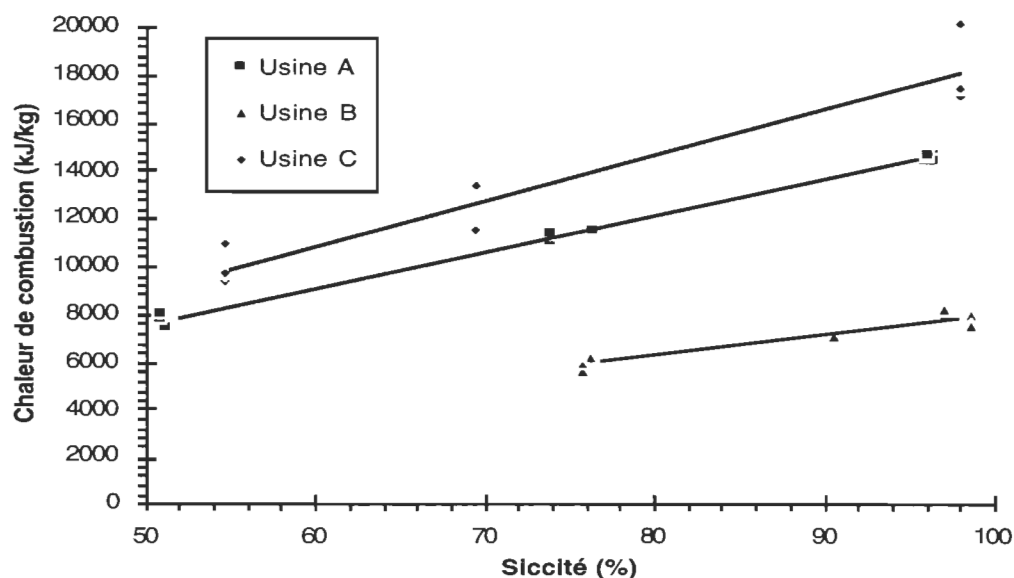
La Figure 5.4 présente le potentiel énergétique de chacune des boues étudiées en fonction de leur siccité. Comme il fallait s'y attendre, ce sont les boues de l'usine C qui possèdent la plus grande chaleur de combustion étant donné qu'elles contiennent la plus grande proportion de matière combustible. La chaleur de combustion de ces boues est de 18 200 kJ/kg à 98% de siccité. Cette valeur se rapproche de la valeur maximale généralement reconnue de 20 000 kJ/kg b.s. pour les boues primaires ou les écorces.

Les boues de l'usine C ont donc une chaleur de combustion qui varie de 18 200 kJ/kg à 98% de siccité à 10 000 kJ/kg à 55% de siccité. Les boues de l'usine A, qui contiennent une certaine part de matière non combustible viennent ensuite avec des chaleurs de combustion allant de 14 600 kJ/kg à 96% à 7 910 kJ/kg à 51% de siccité.



**TABEAU 5.3** Concentration moyenne de certains métaux dans les boues de désencrage

Élément	Usine A (ppm)	Usine B (ppm)	Boues municipales (ppm)
As	42	34	2,7
Co	3,4	9,2	17,3
Cr	12,2	11,7	44,5
Cu	20,6	18,3	699
Mo	18	38	11,3
Ni	3,7	7,9	20,8
Pb	15	16	98
Hg	nd (20 ppm)	nd (20 ppm)	1,6
K	98	94	5032
Mn	9	18	1113
Na	183	238	—
Zn	15	48	595
Ba	19	31	400



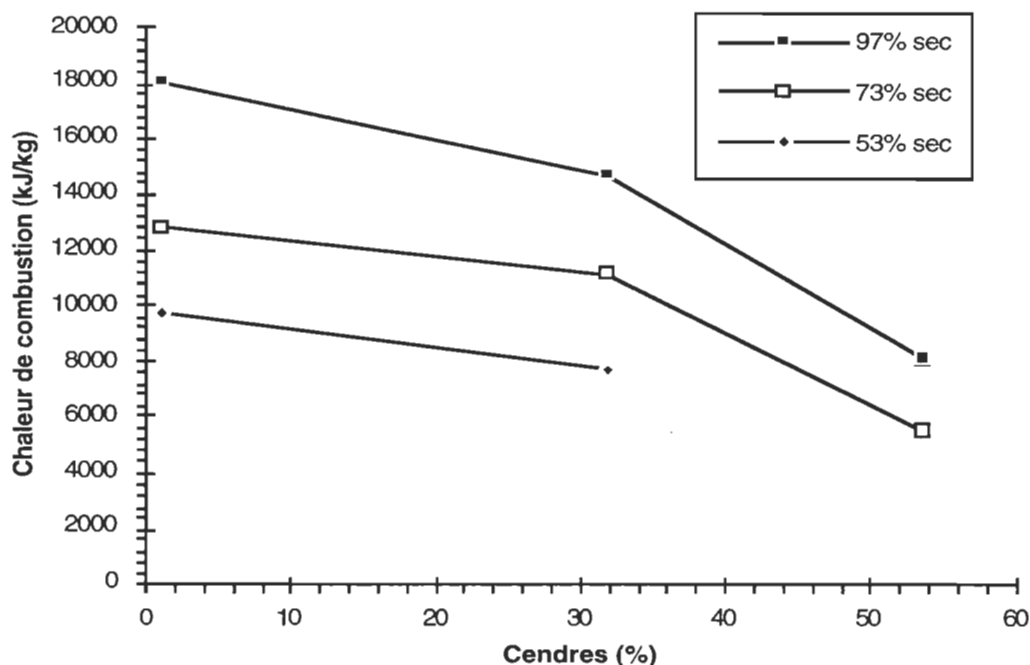
**Figure 5.4** Chaleur de combustion des boues en fonction de la siccité

Finalement, les boues de l'usine B, qui diffèrent des boues des usines A et C



par leur contenu beaucoup plus faible en matière combustible nous montrent des chaleurs de combustion allant de 7 900 kJ/kg à 97% de siccité à environ 6 000 kJ/kg à 76% de siccité, soit environ la moitié des valeurs mesurées pour les usines A et C, tel que mentionné à la section 5.1.

Comme on l'a déjà vu, la chaleur de combustion des boues est influencée par la quantité de cendres qu'elles contiennent. On a donc reporté les valeurs de chaleur de combustion des trois boues étudiées en fonction de leur contenu en cendres. Étant donné qu'il n'a pas été possible d'obtenir les mêmes siccités pour les essais sur les trois types de boues, les valeurs présentées ici ont été calculées à partir des résultats de chaleur de combustion. On peut voir à la Figure 5.5 l'effet du contenu en charges pour trois siccités différentes soit : 95, 73 et 53%. Il est à noter que les boues de l'usine B ne peuvent brûler à 53% de siccité sans apport de combustible d'appoint et que la diminution de la chaleur de combustion est moins marquée entre les boues des usines C et A qu'entre celles des usines A et B.



**Figure 5.5** Chaleur de combustion des boues en fonction du contenu en cendres

### 5.3 Séchage des boues

Une fois le potentiel énergétique de chacune des boues déterminé, il s'agit de procéder au séchage de ces boues en utilisant idéalement une énergie inférieure à celle que l'on peut récupérer de leur combustion. Les essais sur unité pilote ont montré que l'énergie de séchage des boues de l'usine A en fonction de leur siccité finale suivait une courbe exponentielle illustrée à la Figure 5.6. Rappelons que l'énergie de séchage correspond à la capacité thermique des éléments chauffants sur l'unité pilote et est représenté en kJ par kg de boues humides. La hausse de l'énergie de séchage est assez lente jusqu'à environ 85% de siccité finale puis, la taux d'augmentation de l'énergie de séchage s'accroît rapidement jusqu'à 100% de siccité. En effet, l'énergie de séchage passe de 0 kJ/kg de boues (aucun chauffage, on sèche avec de l'air à température ambiante) pour une siccité finale de 68% à environ 2 500 kJ/kg de boues pour une siccité finale d'environ 85% soit environ 2 500 kJ/kg pour 17% d'augmentation de siccité. Cependant, le coût en énergie des points de siccité suivants, soit à plus de 85% est beaucoup plus élevé : 4 500 kJ/kg pour 12 points de siccité. Ce phénomène s'explique par le fait que l'eau contenu dans les fibres se retrouve sous deux formes : libre et liée. On sait que l'eau liée peut représenter jusqu'à 10 à 12% de l'eau totale contenue dans les fibres. Cela correspond à ce que l'on observe sur la courbe présentée à la Figure 5.6.

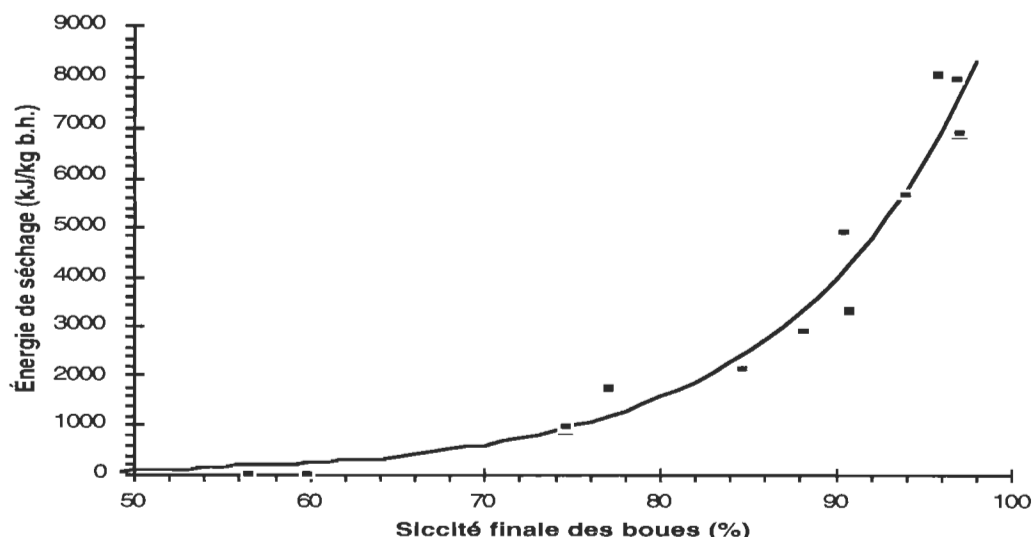
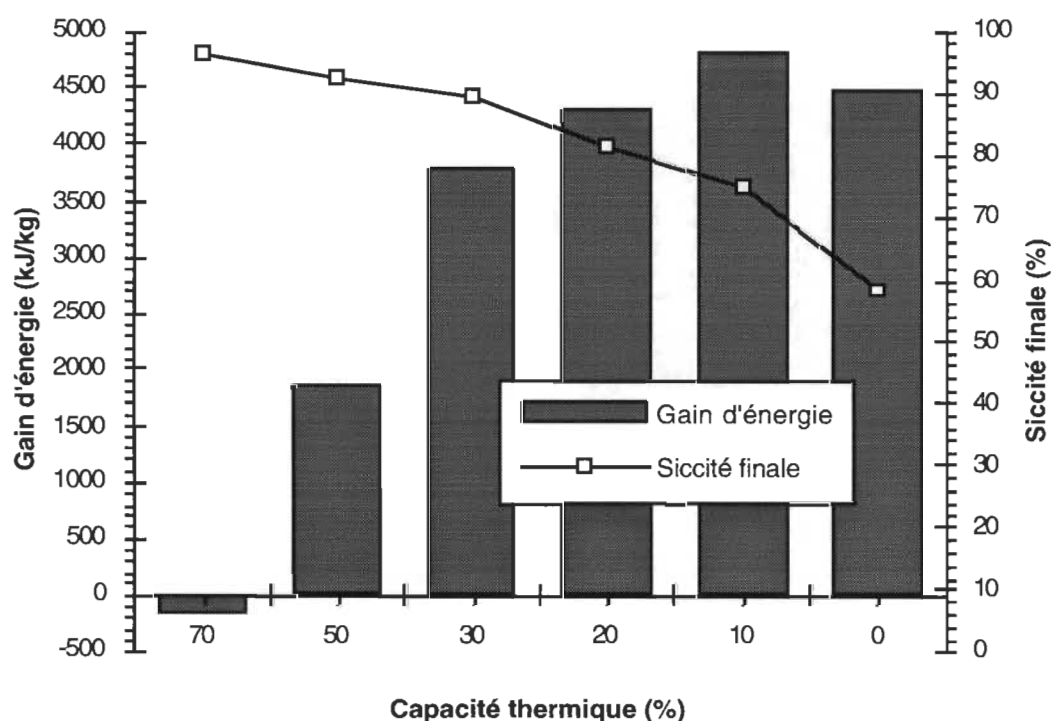


FIGURE 5.6 Détermination des conditions de séchage sur l'unité pilote

Une fois l'énergie de séchage des boues en fonction de la siccité finale connue, il s'agit de déterminer la capacité thermique qui donne le meilleur gain d'énergie ainsi qu'une siccité finale adéquate à l'autocombustion des boues. La Figure 5.7 montre que le gain maximum se situe à 10% de capacité thermique sur l'unité pilote. La siccité finale des boues y est de 75%. Il est à noter que lorsque l'on ne chauffe pas l'air dans l'appareil, c'est-à-dire à une capacité de 0%, on obtient un gain d'énergie appréciable. Cependant, la siccité des boues passe de 51 à 57%, ce qui est insuffisant pour obtenir l'autocombustion des boues. À l'autre extrémité, lorsque l'on utilise 70% de capacité thermique, les résultats sont doublement négatifs : on obtient une perte d'énergie et la siccité finale de 97% est trop élevée, ce qui peut entraîner des problèmes lors de la combustion comme il a été mentionné à la section 3.1. Étant donné que notre objectif n'est pas d'optimiser le séchage des boues, mais bien d'évaluer leur potentiel énergétique, il a été convenu d'effectuer les essais de séchage à 30% de capacité thermique, ce qui permettra d'effectuer des calculs de gain d'énergie conservateurs.



**Figure 5.7** Gain d'énergie en fonction de la capacité thermique de l'unité pilote

En effet, à 30% de capacité thermique, on observe un gain d'énergie appréciable ainsi qu'une siccité finale d'environ 88% à laquelle le matériel est facilement maniable, par exemple pour en faire des pastilles. L'autocombustion pourrait aussi s'effectuer sur les boues séchées à 10 et 20% avec des gains supérieurs mais des siccités finales inférieures. Le choix de la siccité finale diffère selon la méthode de combustion utilisée.

Les essais de séchage des boues ont été effectués sur l'unité pilote aux conditions que l'on vient de déterminer, soit 30% de capacité thermique pour une température d'entrée dans l'unité pilote de 70 à 75°C et une température de sortie de 43 à 45°C (Tableau 5.4). Pour les boues de l'usine A, la siccité passe de 50,8% à 89,5%. L'énergie de séchage est de 2 100 kJ/kg de boues humides. La combustion de ces boues séchées dégage 13 600 kJ/kg, pour un gain de 11 500 kJ/kg. On peut se surprendre que les boues de l'usine C nécessitent une énergie de séchage de 5 400 kJ/kg, soit plus du double de l'usine A, alors que leur combustion dégage 16 000 kJ/kg. Ce phénomène s'explique facilement : la siccité initiale des boues de l'usine C est beaucoup plus faible que celle de l'usine A. Cela veut donc dire que l'énergie de séchage est plus grande pour atteindre une siccité finale similaire, car il y a plus d'eau à évaporer. Le débit des boues dans l'unité doit aussi être réduit étant donné que le temps de résidence est augmenté. Les résultats obtenus pour le mélange des boues des usines A et C dans des proportions de 20%-80% montrent que l'ajout de boues de l'usine A, plus sèches initialement, permet un gain d'énergie de 9 800 kJ/kg pour une siccité finale de 82.2%. En effet, l'addition de seulement 20% de boues de l'usine A, plus sèches, a permis d'augmenter le gain d'énergie de 779 à 3 002 kJ/kg, soit près de 400%.

Les boues de l'usine B ont causé plusieurs problèmes lors du séchage. Le fait que celles-ci contenaient beaucoup d'eau et de charges minérales les faisait adhérer aux parois de la soupape d'admission et du désintégrateur pour éventuellement colmater l'alimentation et rendre le séchage impossible. Des tentatives pour remédier au problème ont été envisagées comme réduire le débit des boues, mélanger les boues à des boues sèches ou enduire la soupape d'admission et le désintégrateur de Téflon en aérosol, mais aucune ne s'est révélée efficace. Le seul moyen de régler ce problème semble être de modifier la

configuration de l'alimentation en installant, par exemple, une vis sans fin. Il a cependant été possible de sécher un mélange de 50% de boues de l'usine B et 50% de l'usine C. Les résultats montrent une perte d'énergie de 700 kJ/kg pour une siccité finale de 90%.

**Tableau 5.4 Séchage des boues**

<b>Boues</b>	<b>Siccité (%)</b>		<b>Énergie (kJ/kg b.h.)</b>		
	<b>initiale</b>	<b>finale</b>	<b>Séchage</b>	<b>Combustion</b>	<b>Gain</b>
Usine A	50,8	89,5	2 100	13 600	11 500
Usine B	37,5	-	-	-	-
Usine C	38,6	86,7	5 400	16 000	10 600
Mélange I	44,2	82,2	3 200	12 800	9 600
Mélange II	38,3	90,1	9 900	9 200	- 700

## **CHAPITRE VI**

### **CONCLUSION**

Les conclusions que l'on peut tirer des résultats de notre étude se situent à cinq niveaux représentant chacun des objectifs poursuivis.

#### **A) Composition des boues**

On constate que la composition des boues de désencrage révèle le type de vieux papiers recyclé et est liée au type de pâte produit. En effet, les boues de l'usine B, qui produit du papier tissés contient plus de charges minérales que les deux autres boues étudiées. On voit que le contenu en eau varie en fonction du type de presse utilisée et de la composition des boues. Les boues de désencrage étudiées sont donc constituées d'eau, de fibres fines, de charges minérales (glaise, carbonate de calcium), d'autres métaux (cuivre, chrome, arsenic) et d'acides gras provenant de la flottation.

Certains acides résiniques provenant du bois sont toujours présents dans les boues malgré toutes les opérations effectuées sur le papier entre la mise en pâte initiale et la fin du procédé de désencrage.

#### **B) Chaleur de combustion**

La chaleur de combustion des boues est influencée par deux facteurs : le contenu en eau et le contenu en matière non combustible. On a déterminé que la chaleur de combustion des boues varie de façon proportionnelle au contenu en eau pour des plages de consistance de 50 % à 96 % pour l'usine A, de 76 % à 98 % pour l'usine B et de 56 % à 98 % pour l'usine C. La chaleur de combustion diminue avec l'augmentation du contenu en matière non combustible. On note une baisse plus marquée entre 30 % et 55 % qu'entre 1 % et 30 %.

La chaleur de combustion des boues sèches varie entre 5 000 et 18 000 kJ/kg selon le contenu en matière non combustible alors qu'elle varie entre 6 000 à 14 000 kJ/kg à une siccité de 80 %.

### **C) Séchage des boues**

L'augmentation de l'énergie nécessaire au séchage des boues sur l'unité pilote utilisée est proportionnelle à la siccité jusqu'à une siccité de 85 %. Par la suite, l'augmentation est beaucoup plus rapide. Pour les boues de l'usine A, le séchage des boues de 51 à 90 % de siccité nécessite 2 082 kJ/kg b.h. alors que pour l'usine C, 5 360 kJ/kg b.h. sont nécessaires pour sécher les boues de 39 à 87 %. Il n'a pas été possible de sécher les boues de l'usine B à l'aide de l'unité pilote à cause de nombreux obstacles techniques liés à leur composition. L'étude du séchage des mélanges de boues révèle que l'ajout de 20 % de boues de l'usine A à celle de l'usine C permet de réduire l'énergie de séchage de ces dernières de 2 133 kJ/kg b.h. soit près de 40 %.

### **D) Essais de séchage des boues**

Des gains d'énergie ont été obtenus pour les boues des usines A, C et pour le Mélange I (80 % Usine C, 20 % usine A). Il a également été possible de sécher les boues de l'usine B en mélange avec celles de l'usine C. Cependant, aucun gain d'énergie n'a été observé.

En terminant, il serait intéressant de mentionner les modifications qui pourraient être apportées à l'unité pilote afin d'augmenter ses performances. Le système d'alimentation devrait être adapté pour permettre d'accepter les boues à haut contenu en cendres comme celles de l'usine B. Pour y parvenir, la soupape d'alimentation pourrait être remplacé par une vis sans fin ou utiliser un matériel sur lequel les boues ne peuvent adhérer, comme le téflon. On pourrait aussi recirculer une partie de l'air chaud à la sortie du séchoir, ce qui réduirait l'énergie nécessaire au chauffage de l'air à l'alimentation. Il faudra cependant tenir compte de l'accumulation de l'humidité à l'intérieur du séchoir.

## CHAPITRE VII

### BIBLIOGRAPHIE

1. Jacobson, W., Sallee, B., «Full-Scale Bubbling Fluidized-Bed Combustion System for Sludge Disposal and Energy Generation for the Paper Recycling Process», TAPPI Environ. Conf. Proc., Richmond, Virginia, pp. 127-140 (1992).
2. Canadian Pulp and Paper Association, «Mandated Use of Recycled-Content Newsprint in the United States», Working paper for Economic Policy Committee Meeting (Agenda item #2a), Montréal, pp. 1-3 (October 3, 1989).
3. Anonyme, «Le recyclage... à la Québécoise», Le Papetier 28 (2): 3-5 (1992).
4. Association canadienne des pâtes et papiers, «Le recyclage du papier au Canada - 1992», Montréal, pp. 12-13 (1992).
5. Beauchemin, S., Laverdière, M. R., Scraire, C., «Revue de littérature sur les métaux, l'azote et le phosphore dans les boues d'origine municipale, de pâtes et papiers, de désencrage en prévision de leur valorisation en milieu agricole et forestier», Québec, Ministère des Forêts, Direction de l'environnement, pp. 8-23 (1993).
6. Stein, R. M., Fiss Jr., E. C., Wu, J.-Y., «Mills Search for New Waste Disposal Methods as Landfill Policy Tightens», Pulp Paper 63 (9): 210-212 (1989).
7. Schriever, K. E., «Mill Chemistry Must Be Considered Before Making Line Decision», Pulp Paper 64 (3): 76-79 (1990).
8. Carroll, R. C., et Gajda, T. P., «Mills Considering New Deinking Line Must Answer Environmental Questions», Pulp Paper 64 (9): 201-205 (1990).



9. Ferguson, L. D., «Deinking Chemistry: Part 2», Tappi J. 75 (12): 50-55 (1992).
10. Morrison, J. B., «Papermakers Must Debunk Myths to Master Recycled Technology», Am. Papermaker, 55 (4): 48-50 (1992).
11. Hoekstra, P. L., «Paper Recycling Creates Its Own Set of Environmental Problems», Am. Papermaker 54 (4): 30-33 (1991).
12. AP Staff Report, «Recycling Sludge Helps Agriculture in Pope & Talbot Landspreading program», Am. Papermaker, 55 (4): 46-47 (1992).
13. Goldstein, N., «Land Applications of Industrial Wastes», Biocycle, 26 (7): 22-23 (1985).
14. Guilbert, A. F., «Consolidated Papers Inc's Consogro Program - An Evaluation», TAPPI Environ.Conf. Proc., Mobile, Alabama, pp. 221-225 (1985).
15. Shimek, S., Nessman, M., Charles, T., Ulrich, D., «Paper Sludge Land Application Studies for Three Wisconsin Mills», TAPPI Environ. Conf. Proc., Charleston, South Carolina, pp. 413-422 (1988).
16. Aspitarte, T. R., Rosenfeld, A. S., Smale, B. C., Amberg, H. R., «Pulp and Paper Mill Sludge Disposal and Crop Production», Tappi (56) 11: 140-144 (1973).
17. Eck, T. H., «Primary and Secondary Sludge Disposal by Spray Irrigation», Tappi J. 69 (11): 54-59 (1986).
18. Watson, M. E., Hoitnik, H. A., «Utilizing Papermill Sludge ...Longterm Effects on Stripmine Reclamation», Biocycle 26 (5): 50-52 (1985).
19. Logan, T. J., Esmailzadeh, H., «Utilizing Papermill Sludge ...Use on Cropland», Biocycle 26 (5): 52-53 (1985).
20. Hatch, C. J., et Pepin, R. G., «Recycling Mill Wastes for Agricultural Use» Tappi J. 68 (11): 70-73 (1985).

21. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, «Valorisation agricole des boues de stations d'épuration des eaux municipales», Guide des bonnes pratiques, Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement et de la Faune, 60 p. (1987).
22. Hart, J. B., Nguyen, P. V., Urie, D. H., Brockway, D. G., «Silvicultural Use of Wastewater Sludge», J. Forestry, 86 (8): 17-24 (1988).
23. Harrington, C. A., DeBell, D. S., «Effects of Irrigation, Pulp Mill Sludge, and Repeated Coppicing on Growth and Yield of Black Cottonwood and Red Alder» Can. J. Forest Res. 14 (6): 844-849 (1984).
24. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, «Valorisation sylvicole des boues de stations d'épuration des eaux municipales», Guide des bonnes pratiques, Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement et de la Faune, 83 p. (1991).
25. Alpert, J. E., Epstein, E., De Groot, C., «Composting Offers Alternatives for Effluent Plant Sludge Disposal», Pulp Paper 56 (11): 127-129 (1982).
26. Smyser, S., «Compost Paying its Way for Paper Producer», Biocycle 23 (3): 25-26 (1982).
27. Carter, N., «Composting Disposes of Sludge, Yields Byproducts at Glatfelter», Pulp Paper 57 (3): 102-104 (1983).
28. Borde, V., «Cascade composte ses déchets de désencrage», Pap. Carton Cellul., 32 (6): 68 (1993).
29. Wysong, M. L., «CZ's Solids Waste Problems at Wauna Are Reduced by Composting», Pulp Paper 50 (10): 112-113 (1976).
30. Campbell, A., Engebretson, R., Tripepi, B. T., «Composting of a Combined RMP/CMP Pulp and Paper Effluent», TAPPI Environ. Conf. Proc., San Antonio, Texas, pp. 727-738 (1991).
31. Simonsen, H. I., Davy, M. F., McBride, G.E., «Research and

Development Opportunities for Improvements in Energy Efficiency in the Canadian Pulp and Paper Sector to the Year 2010», Contrat DSS no 23440-0-9667. Direction de la technologie et de l'efficacité énergétique et des énergies de remplacement, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Ottawa, Ontario (1993).

32. Aubertin, A., «L'utilisation des résidus de pâtes et papiers dans la fabrication de matériaux destinés aux projets de réhabilitation des sites dégradés», Conférence technique estivale ACPP, Pointe-au-Pic, Canada, p. 5 (1993).
33. Shoemaker, G. H., Dickinson, R. H., «Disposal of Sludge From Pulp and Paper Mills», Tappi 62 (9): 53-55 (1979).
34. Paquot, M., et Hermans, L., «Alternatives possibles à la mise en décharge des boues de papeteries. Un exemple: Wiggins Teape (Belgique) S.A.», Trib. CEBEDEAU 36 (473): 147-155 (1983).
35. Tremblay, H., «La pyrolyse sous vide: pour le traitement-valorisation des boues d'usines de pâtes et papiers», Conf. tech. est. ACPP, Pointe-au-Pic, Canada, pp. 3-12 1993 .
36. Centre Technique du Papier, «L'utilisation des boues de papeteries», Le Point sur..., 1 (2): 9 (1982).
37. Tiwary, K. N., Jivendra, «An Economic Disposal of the Sludge from Paper Machine Effluent», Indian Pulp Paper, 37 (3): 8-13 (1982).
38. Guilhem, J., «Reconstruire pour mieux recycler», Pap. Carton Cellul., 41 (6) : 29-31 (1992).
39. Bianchin, B., «Boues de papeteries: le point sur leur valorisation et leur utilisation», ATIP Rev. 34 (10): 490-507 (1990).
40. Huston, B. L., Hans Beer, E., Hardesty, K. L., «Recycling of Non-Integrated Paper Mill Sludge and Ash into Cement», TAPPI Environ. Conf. Proc., San Antonio, Texas, pp. 657-660 (1991).

41. Gigliotti, L. M., Peyton, R. B., «Utility of a Public Acceptance Survey for Forest Application Planning : A Case Study» in «The Forest Alternative for Treatment and Utilization of Municipal and Industrial Wastes», D.W. Cole, C.L. Henry, W.L. Nutter, Univ. Wash. Press, Seattle, pp. 367-382 (1986).
42. Bliss, T., «Reject Handliang in Secondary Fiber Systems», TAPPI J. 71 (6): 87-91 (1988)..
43. Dowes, S., «Solid Wastes Solutions», Am Papermaker 56 (4): 36-38 (1993).
44. McKeown, J. J., «SLudge Dewatering and Disposal, A Review of Practices in the US Paper Industry», Tappi 62 (8): 97-100 (1979).
45. Linderoth, C. E., «Paper Mill Sludge as a Valuable Fuel», TAPPI Environ. Conf. Proc., San Antonio, Texas, pp. 393-395 (1991).
46. Kraft, D. L., Orender, C. H. C., «Considerations Using Sludge as a Fuel», TAPPI Environ.Conf. Proc., Nashville, Tennessee, pp. 331-337 (1991).
47. Springer A. M., et Marshall D. W., «Investigation of Reuse Potential of Ash from Papermill Sludges», Stream Improv. Tech. Bull. 285, NCASI, New York (1976).
48. Söderhjlem, L., «Possible Uses for Fibrous Sludges from the Pulp and Paper Industry», Paperi Puu 58 (9): 620-629 (1976).
49. Fuller, R. R., «Gulf States New Multi-Hearth Furnace Waste Treatment System», Southern Pulp Paper Mfr. 37 (12): 22-25 (1974).
50. Hannah, M. A., Boyd, J. A., «Incineration of Effluent Treatment Sludges in a Hogged Fuel Boiler», TAPPI Environ. Conf. Proc., Seattle, Washington, pp. 219-224 (1990).
51. Busbin, S., Hill, G., Mayes, S., «Sludge Dewatering at a 100 Percent ONP Furnish Mill», TAPPI Env. Conf. Proc., San Antonio, Texas, pp. 129-134 (1991).

52. Stokes, H. A., Harriz, J. T., Rawlings, M., «Southeast Paper - Power Plant Case History», TAPPI Eng. Conf. Proc., Seattle, Washington, pp. 75-81 (1990).
53. Mertz, H. A., et Jayne, T. G., «Startup and Operating with the Zimpro® High Pressure Wet Oxydation System for Sludge Treatment and Clay Reclamation», TAPPI Environ. Conf. Proc., Savannah, Georgia, pp. 75-79 (1984).
54. Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, «Détermination des acides gras et résiniques : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse après dérivation avec BSTFA», Québec, Ministère de l'Environnement et de la Faune, pp. 3-21 (1994).
55. Legault, G., et Villeneuve, M. «Le Chimitox: résultats d'évaluation chimico-toxique des établissements industriels du Plan d'action St-Laurent», vol. II, Équipe d'intervention St-Laurent, Direction des services techniques (1992).

# **ANNEXES**

## I - ANALYSE THERMOGRAVIMÉTRIQUE DES BOUES DE DÉSENCRAGE

### 1- Équipement

- Analyseur thermogravimétrique Perkin Elmer 7 Series
- Azote
- Oxygène

### 2- Conditions d'analyse

L'analyse s'effectue sur un échantillon d'environ 20 g de boues sèches. Elle débute sous atmosphère d'azote puis celle-ci est ensuite remplacée par une atmosphère d'oxygène.

#### Atmosphère d'azote

Température initiale 1	:	30°C
Temps 1	:	0 min.
Prog. de température 1	:	20°C/min.
Température initiale 2	:	550°C
Temps 2	:	0 min.
Prog. de température 2	:	20°C/min.

#### Atmosphère d'oxygène

Température initiale 3	:	400°C
Temps 3	:	0 min.
Prog. de température 3	:	20°C/min.
Température finale	:	900°C

La détermination de chaque chute de poids (associée à un composant de l'échantillon) s'effectue à l'aide d'un système informatisé de traitement de données utilisant la dérivée première de la courbe du pourcentage du poids initial (%) en fonction de la température (°C).

## **II- DÉTERMINATION DES MÉTAUX PAR SPECTROSCOPIE D'ABSORPTION ATOMIQUE**

### **1- Équipement**

- Spectrophotomètre d'absorption atomique Perkin Elmer.
- Four à moufle.
- Creusets de céramique et de platine
- Appareil à centrifugation
- Brûleur au propane
- Ballons de 100 mL et bouteilles de 100 mL.

### **2- Réactifs et étalons**

- Acide chlorhydrique concentré
- Carbonate de sodium
- Solutions-étalons des métaux analysés. (Trois concentrations différentes dans la zone de linéarité de l'absorption en fonction de la concentration).

### **3- Préparation des échantillons**

- Peser avec précision environ 5 g d'échantillon sec et placer dans le four à moufle pendant au moins 12 heures à 575°C.
- Ajouter au creuset froid 1 mL d'eau déminéralisée suivi de 14 mL d'acide chlorhydrique concentré. Laisser reposer quelques minutes sous la hotte. Transférer quantitativement dans un tube à centrifugation de 250 mL avec 100 mL d'eau déminéralisée.

### **3- Centrifugation**

- Procéder à la centrifugation de la solution obtenue à 2000 tpm pendant 30 minutes.
- Récupérer le plus de filtrat possible par décantation dans une bouteille de 100 mL sans entraîner de solide.
- Effectuer les dilutions nécessaires.

### **4- Fusion au carbonate de sodium (silicium et aluminium)**

- Fusionner environ 0,2 g du résidu de centrifugation sec avec 2 g de carbonate de sodium dans un creuset de platine à l'aide d'un brûleur au propane.



- Dissoudre le produit avec de l'eau déminéralisée, transférer dans un ballon de 100 mL et compléter au trait de jauge.

L'analyse s'effectue par spectroscopie d'absorption atomique et la concentration des métaux est donnée directement en mg/L (ppm) d'échantillon. Pour l'aluminium et le silicium, on doit ajouter le résultat obtenu lors du dosage de la solution obtenue par fusion au carbonate de sodium.

### **III - ANALYSE DES ACIDES GRAS ET RÉSINIQUES DANS LES BOUES DE DÉSENCRAGE PAR CHROMATOGRAPHIE EN PHASE GAZEUSE COUPLÉE À UN SPECTROMÈTRE DE MASSE APRÈS DÉRIVATION AVEC BSTFA OU BF<sub>3</sub>- MÉTHANOL**

#### **1- Équipement**

- Chromatographe en phase gazeuse HP, modèle 5890.
- Colonne chromatographique capillaire DB-5 de 30 m x 0,25 mm d.i. avec phase stationnaire de 0,25 µm.
- Détecteur de masse spécifique HP, modèle 5972.
- Injecteur automatique HP, modèle 7276.
- Évaporateur sous vide.
- Bloc chauffant pour la dérivation.
- Étuve.
- Système de filtration sous vide avec filtre Whatman 934-AH.
- Système pour extraction de type soxhlet avec joint rodé 45/50.
- Rampe chauffante de type «Lab-line».
- Système d'évaporation sous jet d'azote.
- Micro-balance dont la sensibilité est de 0,1 mg.
- Seringues de 50 à 500 µL.

#### **2- Réactifs et étalons**

Tous les solvants utilisés sont de qualité «glass distilled» ou l'équivalent. Les réactifs commerciaux utilisés sont de qualité A.C.S., à moins d'indication contraire.

##### **2.1 Acides résiniques**

- Acide pimarique
- Acide sandaracopimarique
- Acide isopimarique
- Acide palustrique
- Acide lévopimarique
- Acide déhydroabiétique
- Acide abiétique
- Acide néoabiétique

- Acides chlorodéhydroabiétiques (2 isomères)
- Acide dichloro-12,14 déhydroabiétique

## **2.2 Acides gras**

- Acide myristique
- Acide laurique
- Acide palmitique
- Acide linoléique
- Acide oléique
- Acide stéarique
- Acide dichloro-9,10 stéarique

## **2.3 Étalons internes**

- Hénéicosanoate de méthyle (étalonnage)
- Acide o-méthylpodocarpique (récupération)
- Acide tricosanoïque (dérivation)

## **2.4 Autres**

- Hexane
- Acétone
- Méthanol
- N-O-bis-triméthylsilyle-trifluoroacétamide (BSTFA)
- BF<sub>3</sub>-méthanol
- NaOH en granules
- Solution de NaOH 10%
- Solution d'acide sulfurique 8 N
- Sel de sodium d'EDTA

## **2.5 Solutions-étalons d'acides gras et résiniques de 10 mg/mL**

Pour tous les acides gras et résiniques énumérés en 2.1 et 2.2 (sauf les acides chlorodéhydroabiétiques) ainsi que les étalons de récupération préparer des solutions-étalons de 10 mg/mL de la façon suivante: dissoudre 0,1000 g de chacun des composés dans 10 mL d'acétone.

Pour les acides chlorodéhydroabiétiques, préparer une solution-étalon de 20 mg/mL d'un mélange des deux isomères de la façon suivante : dissoudre 0,2000 g du mélange des deux isomères dans 10 mL d'acétone.

**2.6 Solution-étalon interne d'étalonnage de 12,5 mg/mL**

Dissoudre 0,1250 g d'hénéicosanoate de méthyle dans 10 mL d'un mélange acétone/hexane (40:10).

**2.7 Solution-étalon d'acide tricosanoïque de 1 mg/mL**

Dissoudre 0,0500 g d'acide tricosanoïque dans 50 mL d'acétone.

**2.8 Solution-étalon de récupération de 200 ng/μL**

Dans une fiole jaugée de 100 mL, introduire 2 mL de la solution-étalon d'acide o-méthylpodocarpique de 10 mg/mL et compléter au trait de jauge avec de l'acétone.

**2.9 Solution-étalons pour la dérivation**

Dans une fiole jaugée de 25 mL, introduire 0,1 mL de la solution-étalon interne d'étalonnage et 0,5 mL de la solution-étalon d'acide tricosanoïque et compléter au trait de jauge avec de l'acétone.

**2.10 Solution-étalons d'acides gras et résiniques de 20 ng/μL pour l'étalonnage du spectromètre de masse**

Dans une fiole jaugée de 25 mL, introduire 0,05 mL de chacune des solutions-étalons des acides gras et résiniques ainsi que des étalons de récupération et 0,5 mL de la solution-étalon d'acide tricosanoïque et compléter au trait de jauge avec de l'acétone.

**2.11 Solution-étalons d'acides gras et résiniques de 200 ng/μL pour le % de récupération**

Dans une fiole jaugée de 25 mL, introduire 0,5 mL des solutions-étalons de chacun des acides gras et résiniques de 10 mg/mL et compléter à 25 mL avec de l'acétone.

**3- Protocole analytique****3.1- Traitement à l'EDTA**

- Peser à peu près 2 g secs d'échantillon.
- Ajouter environ 150 mL d'eau et ajuster le pH à 10.5 avec du NaOH 10%.
- Ajouter 20 mL d'EDTA 40%.

**Préparation de la solution d'EDTA:**

- Dissoudre 400 g d'EDTA (sel de sodium) dans 700 mL d'eau.
- Ajouter des granules de NaOH jusqu'à dissolution complète.
- Compléter à 1000 mL.
- Mettre à l'étuve à 60°C pendant 30 min.
- Refroidir et ajuster pH à 4 avec H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 8 N.
- Peser un papier filtre.
- Filtrer sous vide et mettre le papier filtre à l'étuve à 104°C pendant 12 heures.
- Peser le filtre avec précision.

**3.2 Extraction**

- Récupérer les AGR des filtrats et filtrants avec un système soxhlet toute la nuit.
- Vider les soxhlets jusqu'à un volume d'environ 30 mL.
- Filtrer les ballons avec un verre fritté médium, rincer au méthanol et transférer dans un ballon de 50 mL.

Pour l'analyse avec BSTFA seulement :

- Évaporer au rotoévaporateur jusqu'à l'obtention d'un volume d'environ 2 mL.
- Évaporer à sec avec un bloc chauffant sous jet d'azote.
- Reconstituer l'échantillon dans un volume de 5 mL avec de l'hexane.
- Passer à l'étape 3.5

Pour l'analyse avec BF<sub>3</sub>-méthanol seulement :

- Prélever 5 mL et transférer dans tube de 15 mL.
- Ajouter 250 µL de solution-étalon interne d'étalonnage
- Évaporer à sec sur un bloc chauffant sous jet d'azote.

**3.3 Méthylation**

- Ajouter 5 mL de BF<sub>3</sub>-méthanol dans le tube.
- Placer le tube dans un b cher d'eau sur une plaque chauffante (80-90°C) pendant 30 min.
- Refroidir dans de l'eau froide et remplir les tubes avec de l'eau déminéralisée.

**3.4 Extraction**

- Transférer le contenu du tube dans une ampoule   extraction.

- Extraire deux fois avec 20 mL d'hexane.
- Combiner les phases organiques dans un ballon de 100 mL.
- Rotoévaporer presque à sec et transférer quantitativement dans un tube de 15 mL.
- Évaporer à sec et ajouter 0,4 mL d'hexane ou plus selon la concentration de l'échantillon.
- Transférer dans un vial de 0,1 mL pour l'injection.
- Passer à l'étape 3.6.

### 3.5 Dérivation (BSTFA seulement)

- Introduire 100 µL d'échantillon et 100 µL de la solution-étalon pour la dérivation dans un vial de 2 mL et évaporer à sec.
- Ajouter 100 µL de BSTFA, mettre un bouchon de téflon et effectuer la dérivation en chauffant le mélange à 80°C pendant 15 minutes.

### 3.6 Conditions d'analyse et dosage

#### Conditions d'analyse

Température initiale	: 130°C
Temps d'équilibration	: 2 minutes
1re programmation de température	: 10°C/min
Température finale 1	: 180°C
Temps final 1	: 0 minute
2e programmation de température	: 3°C/min
Température finale 2	: 245°C
Temps final 2	: 0 minute
3e programmation de température	: 15°C/min
Température finale 3	: 300°C
Temps final 3	: 5 minutes
Température de la ligne de transfert	: 250°C
Mode d'injection	: «Splitless»
Volume d'injection	: 1 µL
Température de l'injecteur	: 250°C
Délai pour solvant (MS)	: 3 minutes

- Étalonner le chromatographe en phase gazeuse couplée au spectromètre de masse à l'aide de la solutions-étalons d'acides gras et résiniques de 20 ng/μL. Une courbe d'étalonnage est établie en préparant différentes concentrations lors de l'étape de dérivation:

<b>Volume de solution-étalon de 20 ng/μL (μL)</b>	<b>Concentration finale (ng/μL)</b>
25	5
50	10
100	20
150	30
250	50

- Il est à noter que la courbe d'étalonnage est établie en fonction de l'étalon interne.
- Injecter les échantillons préalablement dérivés et calculer la concentration des acides gras et résiniques à l'aide de leur facteur de réponse déterminé lors de l'étalonnage et de la quantité d'étalon interne ajouté à l'échantillon.

#### **4- Calcul et expression des résultats**

Les résultats sont exprimés en μg/L d'acides gras et résiniques d'après l'équation suivante :

$$C = \frac{A \times V_f \times F}{V_i}$$

où

C : concentration d'acides gras et résiniques contenus dans l'échantillon (μg/L).

A : concentration d'acides gras et résiniques contenus dans la solution dosée (ng/μL).

V<sub>f</sub>: volume final de l'échantillon analysé (mL).

V<sub>i</sub>: volume initial de l'échantillon analysé (mL).

F : Facteur de dilution, si nécessaire.

## **IV- DÉTERMINATION DE LA CHALEUR DE COMBUSTION DES BOUES DE DÉSENCRAGE PAR CALORIMÉTRIE DIFFÉRENTIELLE À L'AIDE D'UNE BOMBE CALORIMÉTRIQUE À L'OXYGÈNE**

### **1- Équipement**

- Calorimètre Parr, modèle 1341 et accessoires.
- Bombe calorimétrique à l'oxygène Parr, modèle 1108.
- Thermomètre permettant des lectures à  $\pm 0,005^{\circ}\text{C}$ .
- Presse de laboratoire
- Chronomètre

### **2- Réactifs et étalons**

- Acide benzoïque (grade calorimétrique)
- Oxygène

### **3- Préparation des échantillons:**

- Presser environ 50 g de boues humides sur une presse de laboratoire pendant environ 2 minutes.
- Sécher à l'air ambiant environ 50 g de boues humides.

### **4- Analyse des échantillons**

- Peser précisément environ 1 g de boues ainsi qu'environ 10 cm de fil de fer.
- Placer l'échantillon de boues dans la capsule d'acier inoxydable et attacher le fil de fer aux électrodes.
- Ajouter 1 mL d'eau pour la correction résultant de la formation d'acides au cours de la combustion à haute pression. (Après vérification, cette étape a été éliminée étant donné que les quantités d'acides formées étaient minimales et n'influençaient pas significativement la chaleur de combustion.)
- Refermer la bombe et la purger à l'oxygène à faible débit pendant 2 minutes.
- Placer la bombe dans le bain rempli de 2 L d'eau à la température de la pièce, établir les connexions et démarrer l'agitateur.
- Laisser la température se stabiliser (environ 1 minute) et commencer à prendre des lectures de température (à  $\pm 0,000^{\circ}\text{C}$ ) à toutes les 30 secondes.
- Après 4 à 6 minutes, procéder à la mise à feu.



- Continuer à prendre des lectures aux 30 secondes pendant la montée rapide de la température et pendant environ 5 minutes après sa stabilisation.
- Retirer la bombe du bain, réduire la pression graduellement et récupérer les résidus de combustion ainsi que l'eau.

#### **5- Calcul et expression des résultats**

La chaleur de combustion des boues, en kJ/kg, est calculé à l'aide de la méthode d'extrapolation graphique à partir de la courbe de température en fonction du temps.